



Tuomas Kiuru

## **Peliteorian hyödyntäminen väyläomaisuudenhallinnan päätöksenteossa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 27. marraskuuta 2017

Valvoja: professori Terhi Pellinen

Ohjaajat: FM Milla Lötjönen  
FM Vesa Männistö

<b>Tekijä</b>	Tuomas Kiuru		
<b>Työn nimi</b>	Peliteorian hyödyntäminen väyläomaisuudenhallinnan päätöksenteossa		
<b>Koulutusohjelma</b>	Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka		
<b>Pääaine</b>	Liikenne- ja tietekniikka	<b>Koodi</b>	R3004
<b>Työn valvoja</b>	professori Terhi Pellinen		
<b>Työn ohjaajat</b>	FM Milla Lötjönen ja FM Vesa Männistö		
<b>Päivämäärä</b>	27.11.2017	<b>Sivumäärä</b>	94
		<b>Kieli</b>	suomi

## Tiivistelmä

Väyläomaisuudella on suuri kansantaloudellinen merkitys, koska se mahdollistaa ihmisten ja tavaroiden liikkumisen. Pitkäjänteisellä väyläomaisuudenhallinnalla kalliista väyläinvestoinneista pyritään saamaan suurin mahdollinen hyöty, mitä saattaa kuitenkin hankaloittaa vain lyhyeksi ajaksi kerrallaan myönnettävä rahoitus. Tässä diplomityössä selvitetään, pystytäänkö omaisuudenhallinnasta ja rahoituksesta vastaavien tahojen keskinäistä vuorovaikutusta sujuvoittamaan peliteorian avulla. Peliteoria on sovellettua matematiikkaa, jonka avulla analysoidaan eri osapuolten strategista käyttäytymistä vuorovaikutustilanteissa.

Työssä suunnitellaan rautatieomaisuudenhaltijoiden, päättäjien ja kuljetuksia tarvitsevien asiakkaiden välinen peli, jossa omaisuudenhaltijoilla on täysi informaatio kuljetusten tarvitsijoiden preferensseistä. Kuljetusten tarvitsijat pyrkivät minimoimaan kustannuksensa, mitä omaisuudenhaltijat edistävät päättäjien myöntämän rahoituksen sallimissa rajoissa. Omaisuudenhaltijat tai kuljetusten tarvitsijat eivät pysty ennakoimaan päättäjien myöntämän rahoituksen suuruutta.

Tarkasteltavassa pelissä on 256 teoreettisesti mahdollista kehityskulkua, joista suurin osa voidaan hylätä yksinkertaistavien oletusten perusteella, jolloin peli supistuu 48 tulemavaihtoehtoon peliksi. Peli on teoreettinen kuvaus tapahtumista, mutta sitä ei pystytä käytännössä ratkaisemaan, koska päättäjien käyttäytymistä ei onnistuta kuvaamaan deterministisesti, vaan se näyttäytyy satunnaisena. Siksi pohditaan myös, miten kuljetusten tarvitsijat voisivat vähentää päättäjien toiminnan näennäistä satunnaisuutta. Tässä pelissä omaisuudenhaltijat ovat ulkopuolisia, neutraaleja toimijoita. Kuljetusten tarvitsijat voivat parantaa vaikutusmahdollisuuksiaan hankkimalla lisäinformaatiota väyläomaisuuden kunnosta, mikä onnistuu matemaattisen mallintamisen avulla.

<b>Author</b>	Tuomas Kiuru		
<b>Title of thesis</b>	Applying game theory to the decision-making of infrastructure asset management		
<b>Degree programme</b>	Transportation and Environmental Engineering		
<b>Major</b>	Transportation and Highway Engineering	<b>Code</b>	R3004
<b>Thesis supervisor</b>	Professor Terhi Pellinen		
<b>Thesis advisors</b>	Milla Lötjönen, MA, and Vesa Männistö, MA		
<b>Date</b>	27 Nov. 2017	<b>No. of pages</b>	94
		<b>Language</b>	Finnish

## Abstract

From an economic perspective, road and rail assets are very significant because they enable the transportation of goods and people. Long-term infrastructure asset management allows for proper realisation of asset value. However, funding is often provided in the short term, which may limit long-term asset management planning. A method that might be able to solve this problem is the implementation of game theory. Game theory is a field of applied mathematics used to analyse the strategic behaviour of agents in interactive situations.

In this study, the behaviour of the stakeholders in infrastructure asset management is modelled as a game involving three players: Rail asset managers, decision makers and clients who need transportation services. Asset managers are assumed to have complete information about the clients' preferences. The asset managers' actions contribute to the clients' aim of minimising their transportation costs. The asset managers face a budget constraint imposed by the decision makers. Neither the asset managers nor the clients can predict the amount of funding granted by the decision makers.

The game being examined has 256 theoretically plausible scenarios, most of which can be disregarded based on simplifying assumptions. The game can thus be reduced to 48 possible outcomes, providing a theoretical representation of events. In practice, however, the game cannot be solved because the decision makers' behaviour cannot be deterministically modelled. From the perspective of others, the decision makers' choices appear to be random. A final thought is given to the clients' attempt of reducing the perceived randomness. In the context of this game, the asset managers can be considered a neutral, external agent. The clients can increase their bargaining power by acquiring additional information about the infrastructure assets' performance, which can be achieved through mathematical modelling.

<b>Keywords</b>	game theory, railway, infrastructure asset management
-----------------	---

# Esipuhe

Ajatus tämän diplomityön tutkimusaiheesta alkoi kypsyä jo yli vuosi sitten, kun Liikenne- ja viestintäministeriössä kaavailtiin liikenneverkosta vastaavaa valtionyhtiötä. Professori Terhi Pellinen oli huomannut minun olevan kiinnostunut liikenteen yhteiskunnallisista vaikutuksista, ja ehdotti minulle, että hanke voisi olla sopiva aihe tulevalle diplomityölleni. Professori Pellisen lisäksi sain jo tuolloin arvokasta apua työn suunnitteluun diplomi-insinööri Anne Herneojalta, diplomi-insinööri Laura Järviseltä, filosofian tohtori Raisa Vallilta sekä diplomi-insinööri Seppo Veijovuorelta, jotka myös järjestivät työlle rahoituksen sillä aikaa, kun itse olin vaihto-opiskelijana Brasiliassa. Suuret kiitokset kaikille!

Vuodenvaihteen jälkeen liikenneverkkoyhtiön suunnittelu keskeytettiin, ja diplomityön tutkimuskohteeksi tarkentui väyläomaisuudenhallinta. Kiitän sekä työn tilannutta Liikennevirastoa että työnantajaani Sito Oy:tä, joka on jo usean vuoden ajan ollut loistava työpaikka kaltaiselleni osa-aikaisesti opiskelevalle teekkarille. Itseoikeutetut kiitokset kuuluvat työn ohjanneille filosofian maisteri Milla Lötjöselle ja filosofian maisteri Vesa Männistölle, joilta sain paljon tärkeitä neuvoja ja kommentteja sekä kannustusta. Työn valvonutta professori Pellistä kiitän niin ikään kaikesta palautteesta ja avusta. Mainitsematta ei voi jättää myöskään tekniikan tohtori Jarkko Valtosta, joka oli aina valmis keskustelemaan sekä itse työstä että siihen liittyvistä mitä mielenkiintoisimmista suomen kielen vivahteista.

Diplomityön kirjoittaminen oli erittäin opettavainen kokemus. Oli hienoa saada kirjoittaa aiheesta, jossa pääsin pohtimaan liikenteen ja talouden ilmiöiden välisiä yhteyksiä. Aihe ei missään nimessä ollut minulle helppo, mutta sitäkin mielenkiintoisempi.

Teknillisessä korkeakoulussa vuonna 2008 alkaneet opintoni päättyvät tältä erää tähän. Otaniemen ja Aalto-yliopiston ainutlaatuinen korkeakoulu- ja opiskelijayhteisö on tarjonnut minulle upean mahdollisuuden omien kiinnostuksenkohteideni löytämiseksi ja itseni kehittämiseksi. Olen äärimmäisen kiitollinen niistä lukuisista hienoista kokemuksista, joita eteeni on näiden vuosien aikana tullut. Nämä kokemukset eivät tietenkään olisi olleet yhtään mitään ilman kaikkia mahtavia ihmisiä, joiden kanssa ne jaoin. Kiitos kaikille teille, jotka teitte opiskeluajastani näin mahtavan!

Espoossa 27. marraskuuta 2017



Tuomas Kiuru

# Sisällys

<b>Käsitteet</b>	<b>7</b>
<b>Symbolit</b>	<b>11</b>
<b>Lyhenteet</b>	<b>12</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>13</b>
1.1 Väyläomaisuus . . . . .	13
1.2 Väyläomaisuudenhallinta . . . . .	14
1.3 Tutkimusongelma . . . . .	16
1.4 Tutkimuksen tavoite . . . . .	17
<b>2 Peliteoria tutkimusmenetelmänä</b>	<b>19</b>
2.1 Peliteorian historiaa . . . . .	19
2.2 Peliteorian käsitteitä . . . . .	20
<b>3 Aikaisempi liikenneaiheinen tutkimus</b>	<b>25</b>
3.1 Lentoliikenteen ja suurnopeusjunaliikenteen välisen kilpailun mallintaminen peliteorian avulla . . . . .	25
3.2 Vakaan rataverkon suunnittelun peliteoreettinen mallintaminen . . . . .	26
3.3 Maantien kustannusten kohdentaminen ei-atomisia pelejä soveltamalla . . . . .	28
3.4 Ruuhkautumisen ja hinnoittelun mikrotaloustieteellinen perusta peliteorian näkökulmasta . . . . .	28
3.5 Kaupunki-infraomaisuudenhallinnan toimintojen agenttiperusteinen simulointi . . . . .	32
3.6 Tien suorituskyvyn hallinnan peliteoreettinen malli . . . . .	33
3.7 Yhteenvedo tutkimuksista . . . . .	38

<b>4</b>	<b>Omaisuu denhallinnan päätöksenteko pelinä</b>	<b>39</b>
4.1	Tausta . . . . .	39
4.2	Lähtötiedot ja oletukset . . . . .	39
4.2.1	Kuljetusten tarvitsijoiden näkökulma . . . . .	39
4.2.2	Omaisuu denhaltijoiden näkökulma . . . . .	49
4.2.3	Päätäjien näkökulma . . . . .	51
4.3	Laskentaesimerkki . . . . .	52
4.4	Pelin kulku . . . . .	61
4.5	Rataverkon kunnon arviointi . . . . .	68
4.6	Kuljetusten tarvitsijoiden vaikutusmahdollisuudet . . . . .	73
<b>5</b>	<b>Pohdinta ja päätelmät</b>	<b>78</b>
<b>6</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>81</b>
	<b>Viitteet</b>	<b>83</b>

## Käsitteet

agentti	<i>Älykäs</i> ja tavoitehakuinen toimija, joka tekee itsenäisiä päätöksiä ja on vuorovaikutuksessa ympäristönsä kanssa.
altruismi	Epäitsekkäs ja pyyteetön toiminta, jossa muiden <i>hyvinvointi</i> asetetaan oman hyvinvoinnin edelle.
ceteris paribus	Latinankielinen ilmaus, joka tarkoittaa muiden seikkojen pysymistä ennallaan.
dynaaminen peli	Ks. <i>peräkkäinen peli</i> .
ekstensiivinen muoto	<i>Pelin</i> kuvaus, jossa voidaan esittää <i>pelaajien</i> valintojen <i>peräkkäisyys</i> , pelaajien informaation mahdollinen <i>epätäydellisyys</i> sekä ilman varsinaisia tavoitteita pelaavien pelaajien siirrot.
hyvinvointi	Ks. <i>hyöty</i> .
hyvinvointifunktio	Ks. <i>hyötyfunktio</i> .
hyöty	Kuluttajan kokema tyydytys hyödykkeen tai palvelun käyttämisestä.
hyötyfunktio	Funktio $u(S)$ , joka kuvaa <i>agentin strategiajoukosta</i> $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i\}$ saamaa <i>hyötyä</i> $u$ .
informaatiojoukko	<i>Ekstensiivisen muodon pelissä</i> yhdelle <i>pelaajalle</i> kuuluvien päätöksentekosolmujen joukko, jossa hän ei tiedä omaa asemaansa. Jos informaatiojoukossa on vain yksi päätöksentekosolmu, pelaajalla sanotaan olevan <i>täydellinen informaatio</i> .
kaari	Verkon kaksi solmua yhdistävä viiva, väli tai särmä.
minimax	Päätöksentekosääntö, jonka avulla minimoidaan huonoimman mahdollisen kehityskulun (maksimaalinen) kustannus.

Nashin tasapaino	<i>Pelin</i> ratkaisu, jossa yksikään <i>pelaaja</i> ei voi saavuttaa itselleen parempaa <i>tulemaa</i> yksipuolisesti omaa <i>strategiaansa</i> muuttamalla.
normaalimuoto	<i>Pelin</i> kuvaus matriisina, jossa esitetään <i>pelaajien</i> mahdolliset <i>strategiat</i> ja <i>tulemat</i> .
oligopoli	Markkinatilanne, jossa hyödykkeellä tai palvelulla on vain muutama kilpaileva tuottaja.
omaisuudenhallinta	Organisaation koordinoitu toiminta, jolla hyödynnetään <i>omaisuuden</i> arvo.
omaisuus	Kohde, asia tai kokonaisuus, jolla on tai voi olla arvoa organisaatiolle.
pelaaja	<i>Peliin</i> osallistuva <i>agentti</i> .
pelaajan tyyppi	Kuvaus <i>pelaajan</i> yksityisestä informaatiosta, josta muut pelaajat tekevät jotakin todennäköisyysjakamaa noudattavia oletuksia.
pele	Kahden tai useamman yksilön välinen sosiaalinen tilanne.
peräkkäinen pele	<i>Peli</i> , jossa kaikki <i>pelaajat</i> eivät tee päätöksiään samanaikaisesti.
preferenssi	Potentiaalinen valinta kahden toisensa poissulkevan vaihtoehdon välillä.
puhdas strategia	<i>Pelaajan</i> siirtovaihtoehto.
rajakustannus	Yhden lisäyksikön kuluttamisesta tai tuottamisesta koituva kustannus eli kustannusfunktion derivaatta määrän suhteen: $c_m = \partial c / \partial q$ .
ratakilometri	Määrämittainen radan osuus, jonka pituus on kahden peräkkäisen ratakilometrimerkin välinen etäisyys pituusmittausraiteen keskilinjaa pitkin.
rataverkolle pääsy	Rataverkon ratakapasiteetin käyttäminen rautatieliikenteen harjoittamista varten.



rationaalisuus	Johdonmukainen päämäärien tavoitteleva päätöksenteossa.
riskiaversio	Taipumus suosia pientä odotusarvoa pienellä varianssilla suuremman odotusarvon ja suuremman varianssin sijaan.
samanaikainen peli	<i>Peli</i> , jossa kaikki <i>pelaajat</i> tekevät päätöksensä samanaikaisesti.
sekastrategia	Strategia, joka koostuu <i>puhtaista strategioista</i> $s_1, s_2, \dots, s_i$ , joita kutakin pelataan jollakin todennäköisyydellä $p_1, p_2, \dots, p_i \geq 0$ .
staattinen peli	Ks. <i>samanaikainen peli</i> .
strateginen muoto	Ks. <i>normaalimuoto</i> .
tapahtuma	<i>Pelin</i> aikana mahdollisesti tapahtuva asia, johon <i>pelaaja</i> ei pysty omalla toiminnallaan tietoisesti vaikuttamaan.
tulema	Minkä tahansa <i>strategioiden</i> ja <i>tapahtumien</i> yhdistelmän aikaansaama tilanne. <i>Pelaaja</i> voi määritellä kullekin tulemalle <i>hyödyn</i> .
täydellisen informaation peli	<i>Peli</i> , jossa kukin <i>pelaaja</i> tietää kaikkien pelaajien aikaisemmat valinnat.
täyden informaation peli	<i>Peli</i> , jossa kukin <i>pelaaja</i> tietää kaikkien pelaajien <i>tyypit</i> , <i>hyötyfunktiot</i> , <i>tulemat</i> sekä <i>strategiat</i> .
ulkoishaitta	Ks. <i>ulkoisvaikutus</i> .
ulkoishyöty	Ks. <i>ulkoisvaikutus</i> .
ulkoisvaikutus	Toiminnan, transaktion, hyödykkeen tai palvelun aiheuttama vaikutus, joka kohdistuu jollekin ulkopuoliselle taholle, jolla ei ole vaikutusta toiminnan tai transaktion syntymiseen eikä hyödykkeen tai palvelun tuottamiseen. Positiivista ulkoisvaikutusta kutsutaan myös ulkoishyödyksi ja negatiivista vastaavasti ulkoishaitaksi.

vaihtoehtoiskustannus

Valitsematta jätetyistä vaihtoehtoista saamatta jäänyt suurin mahdollinen *hyöty*, kun valitaan yksi vaihtoehto.

älykkyys

Kaiken *pelistä* tiedettävissä olevan tietäminen ja kykeneminen sen perusteella päättämään kaiken, mitä pelistä pääteltävissä on.

## Symbolit

Tässä diplomityössä käytetään eri tieteenaloilla käytössä olevia lyhenteitä, joten saman symbolin käyttöä useassa eri merkityksessä on vaikea välttää kokonaan.

$b$	määrärahan suuruus
$c, C$	kustannus
$CS[a]$	kuluttajan ylijäämä parametrilla $a$
$d$	matka
$E[a]$	parametrin $a$ odotusarvo
$I$	investointikustannus
$m, M$	massa
$N$	nettokuorma
$NPV[a]$	parametrin $a$ nykyarvo
$p$	todennäköisyys
$P$	hinta
$\mathbf{P}$	todennäköisyysmatriisi
$q, Q$	määrä
$r$	diskonttokorko
$R$	riskitoleranssi
$s$	strategia
$S$	strategiajoukko
$t$	aika, aika-askelten määrä
$u, U$	hyöty, hyvinvointi
$\mathbf{x}^{(t)}$	stokastinen vektori
$\gamma$	luottamustaso
$\varepsilon$	kysynnän hintajousto
$\mu$	kunnossapitokustannus
$\pi$	tulema
$\tau$	maksu, vero

## Lyhenteet

ISO	International Organization for Standardization; kansainvälinen standardoimisjärjestö
JKV	junien kulunvalvonta
MAKU	maarakennuskustannusindeksi
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
ROTI	Rakennetun omaisuuden tila
SFS	Suomen Standardoimisliitto SFS ry
TEN-T	Trans-European Transport Network; Euroopan laajuinen liikenneverkko
UIC	Union internationale des chemins de fer; kansainvälinen rautatieliitto

# 1 Johdanto

## 1.1 Väyläomaisuus

Suomen Standardoimisliitto SFS ry ja *International Organization for Standardization* määrittelevät standardissa SFS-ISO 55000 (2014, s. 10 ja 34) omaisuuden tarkoittavan kohteita, asioita tai kokonaisuuksia, joilla on tai voi olla arvoa organisaatiolle. Liikenneviraston omaisuuteen kuuluvia väylärakenteita, laitteita sekä maa- ja vesialueita kutsutaan väyläomaisuudeksi (Tiehallinto 2005a, liite 3). Niiden voitaneen perustellusti sanoa tuottavan omistajalleen arvoa, joka ei kuitenkaan näy liikevoittona valtion taseessa. Sen sijaan arvo koostuu ihmisten liikkumisen ja elinkeinoelämän kuljetusten mahdollistumisesta. Liikenneverkolla tuskin on käyttäjän tai asiakkaan kannalta itseisarvoa, vaan pelkästään välinearvo.

Väyläomaisuus voidaan ryhmitellä sekä väylämuodoittain että omaisuustyypeittäin (Äijö ja Virtala 2011, s. 14–15). Väylämuotoja ovat tiet, radat sekä vesiväylät; omaisuustyyppejä ovat linjaosuudet, taitorakenteet, laitteet sekä varusteet. Tieomaisuus koostuu tierakenteista ja tiepohjista sekä keskeneräisistä alusrakenteista, päällysteistä, silloista, muista rakenteista ja laitteista (Lähde ja Uusheimo 2005, s. 18; Tiehallinto 2005b, s. 22; Tiehallinto 2006, s. 9). Rataomaisuutta ovat kiskot, ratapölkkyt, vaihteet, ratojen tukikerros ja alusrakenne, turvalaitteet, ajolangat, kannattimet, rummut, sillat sekä tunnelit (Paavilainen ym. 2009, s. 32). Vesiväyläomaisuutta ovat itse väylien lisäksi sulku- ja avokanavat, avattavat sillat, turvalaitteet sekä johteet (Kalliokoski ym. 2012, s. 33).

Vuonna 1998 käyttöön otetussa Suomen valtion väyläomaisuuslaskennassa tieomaisuuden alkuarvoksi saatiin kirjanpidon investointimenoista ja vuotuisia korjaustarpeita vastaavista poistoista Lähteen ja Uusheimon (2005, s. 18) mukaan 15,3 miljardia euroa, mutta Tiehallinnon (2005a, s. 13) mukaan 14,5 miljardia euroa. Joka toinen vuosi tehtävän Rakennetun omaisuuden tila (ROTI) -asiantuntija-arvion vuoden 2017 raportissa tieomaisuuden arvon kerrotaan olevan 15 miljardia euroa, rataomaisuuden seitsemän miljardia euroa ja vesiväyläomaisuuden 1,5 miljardia euroa (Suomen Rakenusinsinöörien Liitto RIL ry 2017, s. 21). Valtion taseessa väyläomaisuuden vuoden 2015 arvoksi kirjattiin kuitenkin vain 19,6 miljardia euroa (Valtiovarainministeriö 2016, s. 7).

Uimonen on laskenut Suomen tievarallisuuden arvoksi yli 38 miljardia euroa (2006, s. 47) ja rautatievarallisuuden arvoksi noin seitsemän miljardia euroa (2008, s. 3). Arvot saadaan olettamalla väylille tavallisen lineaarisen arvonaleneman sijaan niin sanottu äkkikuolemakuluminen. Hulten (1991, s. 126) väittää kuitenkin, että vaikka yksittäisten omaisuushyödykkeiden arvonalenema voidaan olettaa yhtäkkiseksi, kokonaisomaisuuden arvonalenemaa kuvaa paremmin geometrinen kuluminen.

Koska väylät muodostavat verkoston, jokaisen yksittäisen väylän voidaan Uimosen

(2010, s. 6) mukaan ajatella aiheuttavan *ulkoishyötyjä* verkon muille osille. Parantuvan saavutettavuuden aiheuttamat ulkoishyödyt huomioon ottamalla hän on arvioinut Suomen tieverkon arvoksi jopa 200 miljardia euroa (Uimonen 2010, s. 70). Peltolan (2013, s. 37) mukaan tämä arvo ilmenee kuitenkin verkosta hyötävien tonttien, peltojen ja metsien 315 miljardin euron kokonaisarvona.

Eri tahojen erisuuruiset arviot Liikenneviraston tie- ja rataomaisuuden arvoista antavat vaikutelman, ettei väyläomaisuuden arvon määrittäminen ole yksiselitteistä. Toisaalta väyläomaisuuden merkityksen analysointi ei välttämättä edes edellytä tarkan euromääräisen arvon tietämistä. Esimerkiksi *World Road Associationin* (2014, s. 7) mukaan tyypillinen tieverkon arvonlisä kansantaloudessa olisi 3–5 prosenttia suhteessa bruttokansantuotteeseen. Tästä seuraisi, että tieverkon euromääräinen arvo vaihtelisi kansantalouden bruttokansantuotteen kanssa korreloiden.

## 1.2 Väyläomaisuudenhallinta

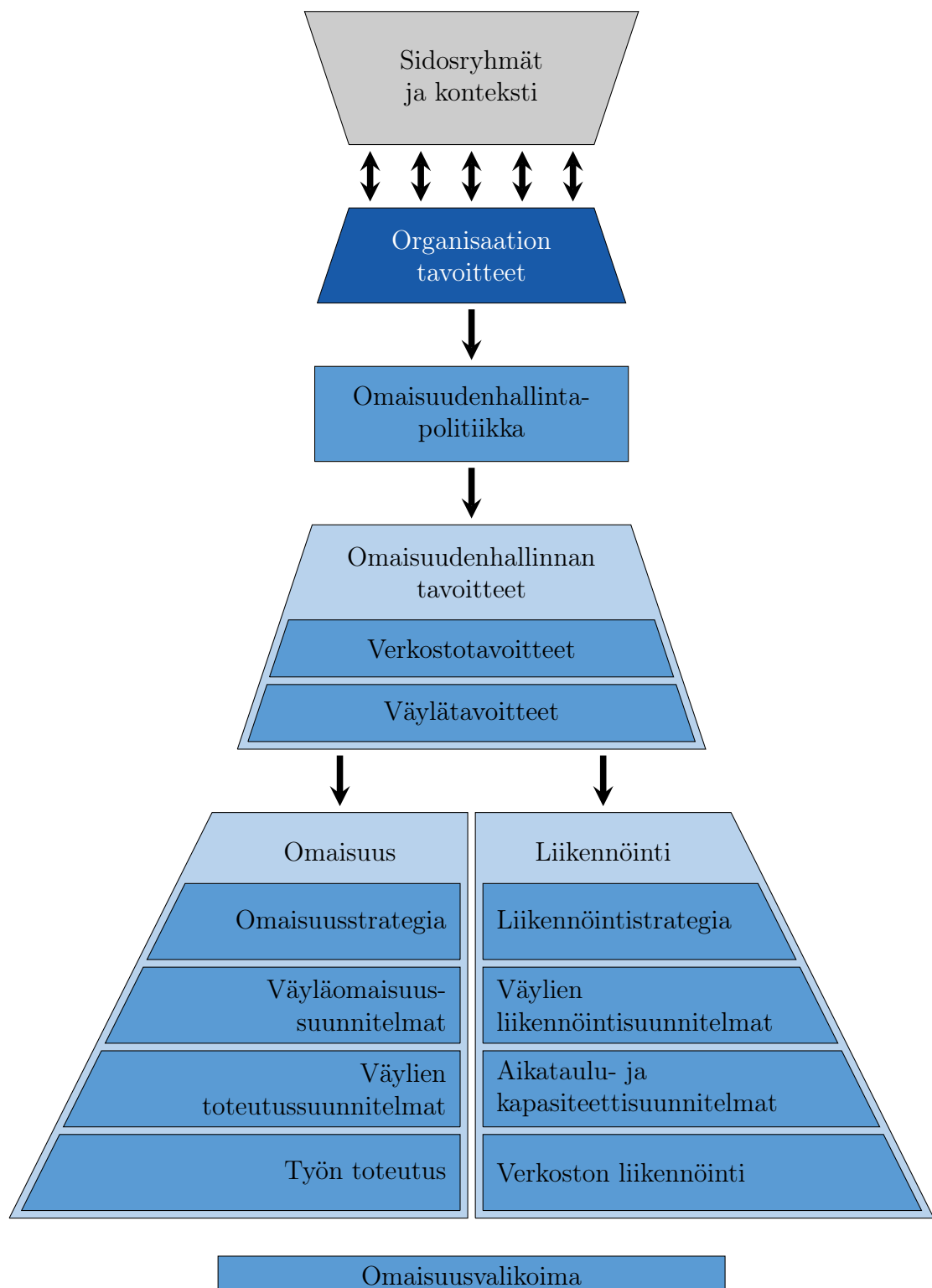
Standardissa SFS-ISO 55000 (2014, s. 14 ja 36) määritellään *omaisuudenhallinta* organisaation koordinoituksi toiminnaksi, jolla omaisuuden arvo hyödynnetään. Arvoa voidaan kuvata myös taloustieteen käsitteillä *hyöty* tai *hyvinvointi*. Jotta väyläomaisuuden arvo saadaan hyödynnettyä parhaalla mahdollisella tavalla, on väyläomaisuutta hallittaessa otettava huomioon sen koko elinkaari (Tiehallinto 2007, s. 6). Kun tämä tehdään järjestelmällisesti, väyläomaisuutta voidaan hallita kokonaisvaltaisesti, mitä Inkala ja Kähkönenkin (2005, s. 14) kirjoituksessaan sivuavat.

Omaisuuksienhallinnalla organisaation tavoitteista saadaan johdettua teknisiä ja taloudellisia päätöksiä, suunnitelmia sekä toimintoja (Paavilainen 2016, s. 2). Vanier (2000, s. 4) on esittänyt, että omaisuushallinnassa on tiedettävä,

- mitä omistetaan
- mikä on sen arvo
- mitkä ovat sen kunnossapitokustannukset
- mikä on sen kunto
- mikä on sen jäljellä oleva käyttöikä
- mitä korjataan ensin.

Eri tahot korostavat omaisuushallinnassa hieman eri kysymyksiä, mutta niiden keskeinen sisältö on usein samankaltainen (Desens ja Petersen 2017, s. 20; Jovanović ja Zoeteman 2010, s. 2–4; Zoeteman 2001, s. 392). Vanier’n luettelossa ei mainita omaisuuden tavoitekuntoa, joka vaikuttaa kunnossapitokustannukseen.

Rautatieomaisuushallinnan osa-alueita esitetään kuvassa 1.



Kuva 1. Standardin ISO 55001 mukainen kuvaus omaisuudenhallinnasta kansainväliseen rautatieliitto UIC:hen kuuluvissa rautatieinfrastruktuuriorganisaatioissa (Union internationale des chemins de fer 2016, s. 23, muokattu).

Euroopan unionin lainsäädäntö on lisännyt rautatieomaisuudenhallintaan liiketoimintamaisia piirteitä aikaisemman teknisen näkökulman lisäksi; rataverkon suorituskyvyn lisäksi omaisuudenhallinnassa on optimoitava kustannuksia ja riskejä (Union internationale des chemins de fer 2015). Rautatieomaisuudenhallinnan erityispiirteitä ovat liikennöintilupien myöntämiseen vaikuttavat tarkat kuntovaatimukset, ratojen kunnossapitäminen liikennöinnin ehdoilla, alalla vaadittu erityisosaaminen, pääosin yksiraiteinen rataverkko sekä mahdollisten paikallisten ongelmien heijastuminen myös muiden rataosien liikennöintiin (Männistö 2013, s. 16).

Laajalla tieverkolla puolestaan omaisuudenhallinta vaikuttaa konkreettisesti kansalaisten jokapäiväiseen elämään, ja monella vähäliikenteiselläkin tiellä on ylläpidettävä peruspalvelutaso (Männistö 2013, s. 16).

### 1.3 Tutkimusongelma

Niukkojen resurssien vallitessa on aina priorisoitava ja tehtävä valintoja (Riley 2011; Schenk 2011; Wallenius 2015a, s. 11). Yhtäältä väylien rakentamisen ja kunnossapidon kokonaiskustannus on suuri, mutta toisaalta niiden laiminlyönnin *vaihtoehtoiskustannukset* eivät näy kirjanpidossa. Siksi resurssien riittävä pitkän aikavälin kohdentaminen väylänpitoon lienee poliittisesti vaikeaa.

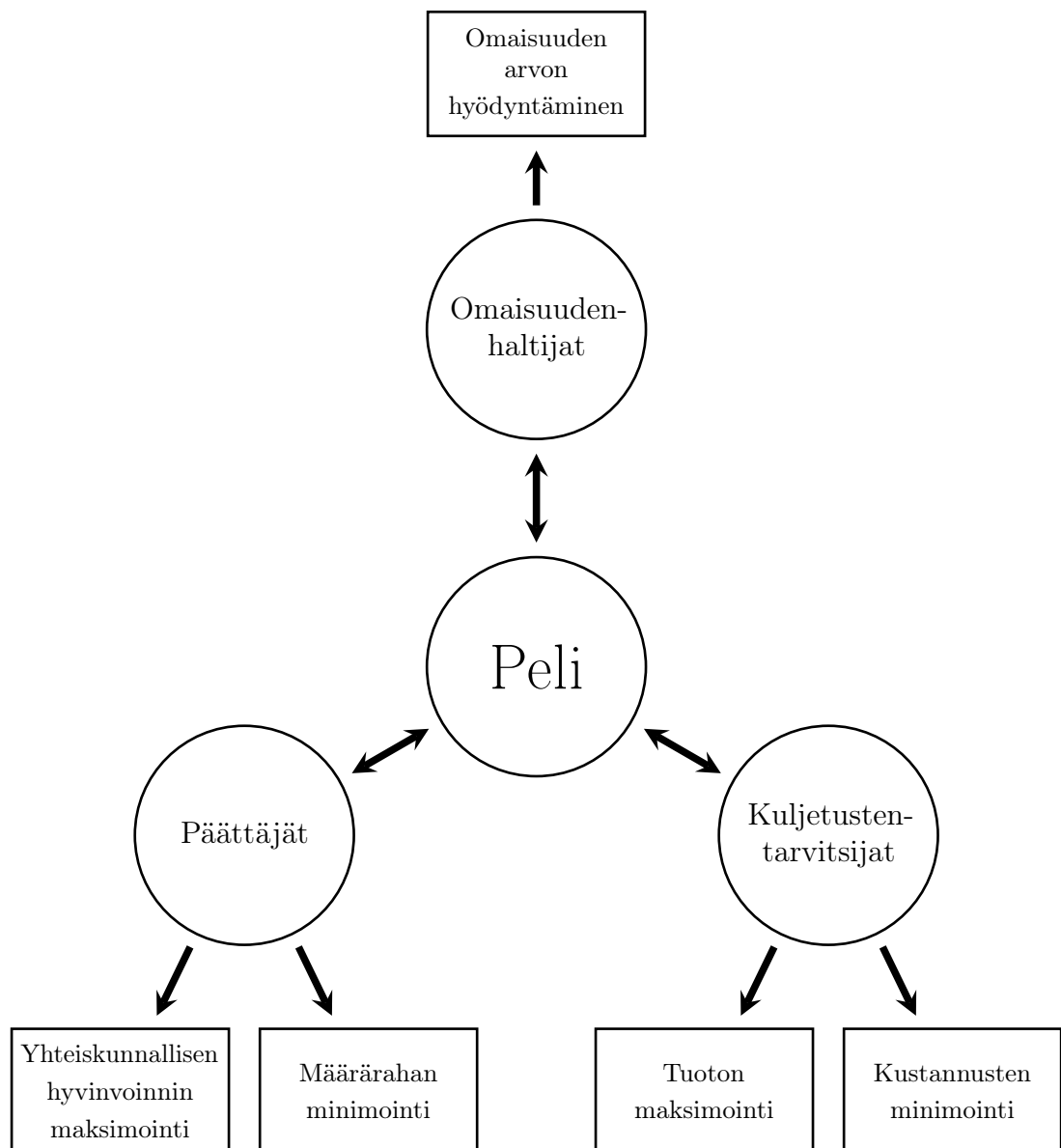
Ominaista väylien korjauksessa ja käytössä on se, että eri sidosryhmillä voi olla eri intressit. Eri sidosryhmiä ovat muun muassa käyttäjät, liikennöitsijät, omaisuudenhaltijat ja päättäjät. Mahdollisia painotuksia voivat olla esimerkiksi elinkeinoelämän ja teollisuuden tarpeet tai kansainväliset, valtakunnalliset, alueelliset tai paikalliset kuljetukset.

Vaikka monivuotiset rahoitus- ja kunnossapitosuunnitelmat mahdollistaisivat tehokkaan väyläomaisuudenhallinnan sekä läpinäkyvän päätöksentekoprosessin vähäisillä kustannuksilla, vain harvalla väylänpitäjällä on tähän mahdollisuus (European Union Road Federation 2014, s. 11). Yleensä määrärahoista päättää vuosittain maan parlamentti.

Ristiriita omaisuudenhallinnan pitkän aikavälin tavoitteiden ja resurssien lyhyen aikavälin rajoitusten välillä voinee johtaa vääränlaiseen osaoptimointiin väylänpidossa. Esimerkiksi norjalaisessa 44 000 asukkaan Larvikin kunnassa havaittiin tieomaisuudenhallinnan avulla, että teiden riittämätön kunnossapito oli aiheuttanut joka päivä 2 000 euron vaihtoehtoiskustannuksen (European Union Road Federation 2014, s. 13).

Voisiko Liikennevirasto saavuttaa väyläomaisuudenhallintansa tavoitteet helpommin, jos eri osapuolet ymmärtäisivät toistensa tavoitteita ja kannustimia aikaisempaa paremmin? Ongelmaa jäsennellään kuljetuksia tarvitsevien asiakkaiden, omaisuudenhaltijoiden sekä päättäjien välisinä vuorovaikutussuhteina, mistä esitetään kaavio kuvassa 2. Tällaista vuorovaikutusta voidaan kutsua *peliksi*.





Kuva 2. Kaavio pelin osapuolten tavoitteista ja vuorovaikutuksesta.

## 1.4 Tutkimuksen tavoite

Peliteoria on eräs käyttökelpoinen menetelmä tutkittaessa tilanteita, joissa vuorovaikutuksessa olevien sidosryhmien tavoitteet saattavat poiketa toisistaan. Esimerkiksi Fiskin (1984, s. 304) mukaan liikennepalveluita tuottavan tai sääntelevän viraston toimintaa voidaan kuvata peliteorian avulla. Suomessa Liikennevirasto ei ole kuitenkaan ennen tätä diplomityötä käyttänyt peliteoriaa väyläomaisuudenhallinnan analysointiin.

Tämän diplomityön tutkimuksen tavoitteena on selvittää, voidaanko peliteoriaa hyödyntämällä tehostaa väyläomaisuudenhallintaa luvun 1.3 mukaisessa tilanteessa. Jotta omaisuudenhallinnan sidosryhmien toimintaa voitaisiin mallintaa kuvassa 2 esitetyllä tavalla peliteoreettisesti ilman, että mallista tulee liian monimutkainen diplomityössä analysoitavaksi, on todennäköisesti tehtävä monia todellisuutta yksinkertaistavia oletuksia. Koska Suomen rataverkko on paljon tieverkkoa suppeampi, ja rautateillä liikennöinti erittäin säänneltyä, oletukset eivät välttämättä vääristä asetelmaa rataverkolla yhtä paljon kuin tieverkolla. Tutkimuksen pelissä tarkastellaan siksi nimenomaan rataomaisuudenhallintaa.

Tämän työn luvussa 2 kuvaillaan ensin peliteoriaa tieteenalana. Luvussa 3 esitellään peliteorian aikaisempia väyläomaisuudenhallintaan ja liikennejärjestelmään liittyviä sovelluksia, minkä pohjalta luvussa 4 suunnitellaan tämän tutkimuksen pelit, joita analysoidaan lyhyesti luvussa 5. Työn yhteenveto on luvussa 6.

## 2 Peliteoria tutkimusmenetelmänä

### 2.1 Peliteorian historiaa

Peliteoria on sovellettua matematiikkaa, jossa tutkitaan vähintään kahden itsenäisen osapuolen eli *agentin* päätöksenteko-ongelmia, joissa kunkin agentin päätöksenteon *tulema* riippuu aina muiden agenttien päätöksistä (Gibbons 1992, s. xi). Päätösvaihtoehtoja kutsutaan *strategioiksi* (Polak 2007, s. 1). Valittujen strategioiden ja *tapahtumien*, joihin agentti ei pysty vaikuttamaan, yhdistelmästä seuraa jokin tulema (Vailati 2012). Kunkin agentin oletetaan toimivan johdonmukaisesti ja pyrkivän maksimoimaan omaa hyvinvointiaan tietäen samalla muiden agenttien noudattavan samoja periaatteita (Aumann ja Hart 1992, s. xi; Estola 2013, s. 2; Lucchetti 2011, s. 3). Agentit ovat monesti ihmisiä, mutta sanalla voidaan viitata myös esimerkiksi yrityksiin tai valtioihin.

Yhdysvaltainunkarilaista John von Neumannia ja yhdysvaltainitävaltalaista Oskar Morgensterniä pidetään peliteorian isinä (Aumann ja Hart 1992, s. xii). Heidän vuonna 1944 julkaistu teoksensa *The Theory of Games and Economic Behavior* antoi alkusysäyksen uudelle tieteenalalle, jota on sittemmin sovellettu niin biologiassa, politiikantutkimuksessa kuin tietotekniikassakin, mutta ennen kaikkea taloustieteessä (Mirowski 1992, s. 113; Myerson 1991, s. 1–2).

Peliteorian kehittymisestä on kuitenkin ollut viitteitä jo kauan ennen von Neumannia ja Morgensterniä. Jo muinaiset babylonialaiset säätivät *Talmud*-kokoelmassaan lain perinnönjaosta tilanteessa, jossa ennen kolmea vaimoaan kuolleen miehen omaisuus ei riittänyt kattamaan kunkin vaimon avioehtoon kirjattua perintövaatimusta (Styrman 2001, s. 2). Lain määräämät jako-osuudet askarruttivat tutkijoita kahden vuosikymmenen ajan, ja vasta Aumann ja Maschler (1985, s. 195–213) osoittivat jaon olevan modernin peliteorian mukainen. Vuoden 1713 kirjassaan *Essay d’analyse sur les jeux de hazard* ranskalainen matemaatikko Pierre Rémond de Montmort pohti voittamistodennäköisyyden maksimoivaa strategiaa *le Her* -korttipeliin (Hykšová 2004, s. 50). Britannialaisen diplomaatin James Waldegraven keksimä ratkaisu ongelmaan on tietävästi peliteorian ensimmäinen, jossa käytetään *sekastrategiaa*.

Ranskalaisten matemaatikkojen Antoine Augustin Cournot’n (1838) ja Joseph Bertrandin (1883, s. 499–508) teorian yritysten voiton maksimoivista tuotantomääristä ja myyntihinnoista *oligopolistisessa* markkinatilanteessa auttavat ymmärtämään, miksi monopolit ja kartellit aiheuttavat hyvinvointitappiota. Vuonna 1950 yhdysvaltalainen matemaatikko John Forbes Nash Jr. yleistä Cournot’n ratkaisun osoittamalla, että jokaisessa äärellisessä pelissä on vähintään yksi sekastrategiatasapaino, mistä hänelle myönnettiin taloustieteen Nobel-palkinto vuonna 1994 (The Sveriges Riksbank Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel 1994).

## 2.2 Peliteorian käsitteitä

Myerson (1991, s. 1) tuo esiin peliteorian (engl. *game theory*) harhaanjohtavuuden käsitteenä, jonka herättämät mielikuvat saattavat olla turhan leikkimielisiä. Hän esittääkin, että käsitteet konfliktianalyysi (engl. *conflict analysis*) tai vuorovaikutteisen päätöksenteon teoria (engl. *interactive decision theory*) voisivat kuvata tieteenalaa tarkemmin. Peliteoria on kuitenkin yleisesti vakiintunut termi, joten sitä käytetään myös tässä diplomityössä.

Kuten Myerson (1991, s. 1–2) toteaa, peliteoriassa *pelillä* tarkoitetaan mitä tahansa kahden tai useamman yksilön välistä sosiaalista tilannetta. Pelin osapuolia kutsutaan *pelaajiksi*. Pelaajat oletetaan tavallisesti sekä *rationaalisiksi* että *älykkäiksi*.

Rationaalinen pelaaja tekee päätöksensä johdonmukaisesti päämääriään tavoitellen (Myerson 1991, s. 2). Hänen myös oletetaan maksimoivan *hyöty-* eli *hyvinvointifunktionsa* matemaattista odotusarvoa, joka riippuu hänen subjektiivisesta todennäköisyysjakaumastaan (Myerson 1991, s. 5). Älykäs pelaaja puolestaan tietää pelistä kaiken, mitä tiedettävissä on, ja osaa päätellä siitä kaiken, mitä tiedon perusteella pääteltävissä on (Myerson 1991, s. 4).

Peli voidaan esittää *normaali-* eli *strategisessa muodossa* tai *ekstensiivisessä muodossa*. Normaalimuotoa käytetään usein kuvattaessa *staattisia* eli *samanaikaisia pelejä*, joissa pelaajat tekevät päätöksensä yhtä aikaa (Policonomics 2012b). *Dynaamiset* eli *peräkkäiset pelit*, joissa pelaajat toimivat vuorotellen, esitetään yleensä ekstensiivisessä muodossa (Policonomics 2012a).

Ekstensiivisen muodon etu normaalimuotoon nähden on mahdollisuus esittää pelin informaation epätäydellisyys. Jos pelaaja ei tiedä, missä pelipuun päätöksentekosolmussa hän on, hänen informaatiojoukkonsa sanotaan koostuvan kaikista hänelle mahdollisista solmuista, jos hänellä on niissä samat siirtovaihtoehdot (Gintis 2009, s. 36 ja 39). Pelipuussa solmut yhdistetään katkoviivalla kuvaamaan informaation epätäydellisyyttä.

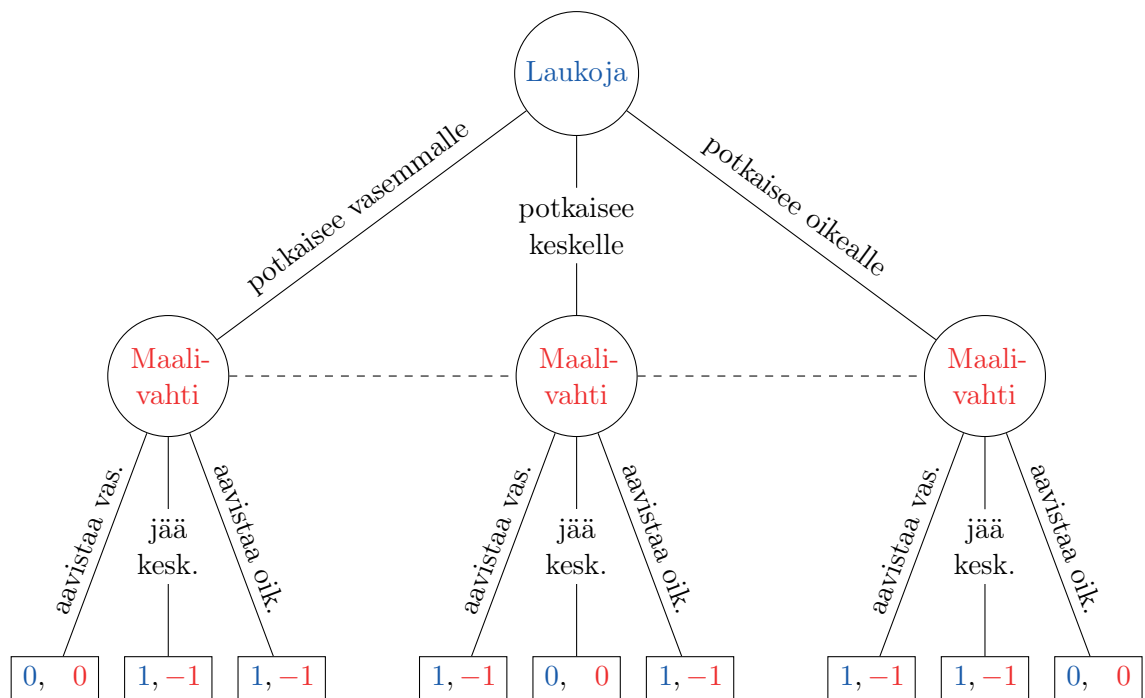
Esimerkki yksinkertaisesta pelistä on jalkapallossa rikkeestä tuomittava rangaistuspotku, jossa rangaistuspotkun laukova pelaaja joukkueesta A yrittää tehdä maalin joukkueen B maalivahdin yrittäessä estää maalin syntymisen. Maalivahdilla ei normaalisti ole aikaa reagoida potkuun, vaan hän joutuu aavistamaan, mihin suuntaan laukoja pallon potkaisee. Jos maalivahti aavistaa oikein, hän torjuu laukauksen, jolloin joukkueiden välinen maaliero säilyy muuttumattomana: tulemat ovat  $\pi_A = 0$  ja  $\pi_B = 0$ . Jos maalivahti aavistaa väärin, pallo menee maaliin, jolloin A:n maalimäärä suhteessa B:n maalimäärään kasvaa yhdellä, eli joukkueen A tulema on  $\pi_A = 1$ . Ekvivalentisti B:n maalimäärä suhteessa A:n maalimäärään vähenee yhdellä, joten joukkueen B tulema on  $\pi_B = -1$ .

Taulukossa 1 esitetään peli normaali- eli strategisessa muodossa ja kuvassa 3 eksten-

siivisessä muodossa. Peliä on yksinkertaistettu olettamalla, että pallon voi potkaista vain joko vasemmalle, keskelle tai oikealle. Laukaus menee siis aina maalia kohti, eikä laukauksen korkeudella ole merkitystä. Maalivahti tietää tämän, ja hänen onnistuu torjua laukaus aina, kun hän aavistaa sen suunnan oikein. Todellisuudessa peli ei tietenkään ole näin yksinkertainen, mutta mieltämällä laukauksen ja aavistamisen suunnat diskreettien valintojen sijaan jatkuviksi jakaumiksi voitaisiin kuvata myös reaali maailman rangaistuspotkua; periaate ei silti muutu.

Taulukko 1. Jalkapallon rangaistuspotku normaalin eli strategisen muodon pelinä esitettynä.

		Maalivahti		
		aavistaa vasemmalle	jää keskelle	aavistaa oikealle
Laukoja	potkaisee vasemmalle	0	1	1
	potkaisee keskelle	1	0	1
	potkaisee oikealle	1	1	0



Kuva 3. Jalkapallon rangaistuspotku ekstensiivisen muodon pelinä. Samaa *informaatiojoukkoon* kuuluvat solmut yhdistetään katkoviivalla.

Yksi peliteorian klassisista malleista on vangin dilemma (Myerson 1991, s. 97 [Luce ja Raiffa 1957]). Pelissä on kaksi vankia, joita epäillään rikoksesta, mutta tuomion langettamiseksi ei ole riittävästi todisteita. Vankeja pidetään kumpaakin omassa sellissään, jolloin he eivät voi kommunikoida keskenään. Vankeja houkutellaan tunnustamaan seuraavin kannustimin:

1. Jos jompikumpi vangeista tunnustaa rikoksen toisen vaietessa, tunnustanut vanki pääsee vapaaksi ja vaiennut saa kolmen vuoden vankeustuomion.
2. Jos molemmat vangit tunnustavat rikoksen, kumpikin saa kahden vuoden vankeustuomion.
3. Jos kumpikaan vangeista ei tunnusta rikosta, kumpikin saa yhden vuoden vankeustuomion.

Vangin dilemman normaalimuotoinen esitys on taulukossa 2.

Taulukko 2. Vangin dilemma normaalimuotoisena pelinä, jossa tulemat ovat menetettyjen vapauden kestoja vuosina.

		Vanki 2	
		vaikenee	tunnustaa
Vanki 1	vaikenee	-1      -1      0	-3      0
	tunnustaa	0      -3      -2	-2      -2

Selvästi nähdään, että tunnustaminen johtaa aina vaikenemista lyhyempään tuomioon *ceteris paribus*, joten Nashin tasapaino pelissä saavutetaan, kun molemmat pelaajat tunnustavat. Ratkaisu ei kuitenkaan ole Pareto-optimaalinen, sillä kummankin vangin kannalta olisi parempi, jos kumpikaan ei tunnustaisi.

Vangin dilemmassa tulemien keskinäinen suuruusjärjestys on tärkeämpää kuin niiden tarkat arvot. Ongelma voidaanakin esittää myös taulukon 3 kaltaisessa yleisessä muodossa.

Taulukko 3. Vangin dilemman yleistetty muoto.

		Pelaaja 2	
		yhteistyö	itsekkyyys
Pelaaja 1	yhteistyö	R      S	T      P
	itsekkyyys	T      S	P      P

Jos pelaajat tekevät onnistuneesti yhteistyötä, molemmat saavat palkkion  $R$  (engl. *reward*). Jos yksi pelaajista pelaa itsekkäästi toisen pyrkiessä yhteistyöhön, houkuttukseen langenneen itsekkään pelaajan tulema on  $T$  (engl. *temptation*) ja yhteistyötä yrittäneen hyväuskoisen pelaajan  $S$  (engl. *sucker*). Jos molemmat pelaajat pelaavat itsekkäästi, kumpikin saa rangaistuksen  $P$  (engl. *punishment*). Yleisen muodon vangin dilemmalle pätee epäyhtälö

$$T > R > P > S. \quad (1)$$

Vangin dilemmaa voidaan soveltaa esimerkiksi oligopolistisen markkinan toiminnan hahmottamiseksi (Picardo 2016). Oletetaan, että kolanmakuisten virvoitusjuomien markkinoilla on vain kaksi tasavahvaa tuottajaa, Coca-Cola ja Pepsi. Kuluttajat eivät pysty maistamaan tuotteiden välisiä eroja, vaan valitsevat kolajuomansa mielikuvien perusteella. Yritykset pystyvät luomaan omasta tuotteestaan positiivisia mielikuvia mainostamalla. Markkinoilla on kysyntää miljardille yhden euron hintaiselle kolajuoma-annokselle.

Jos kumpikaan yritys ei mainosta omaa tuotettaan, kuluttajat tekevät ostopäätöksensä satunnaisesti. Tällöin sekä Coca-Colan että Pepsin markkinaosuus on 50 prosenttia ja myyntituotto 500 miljoonaa euroa.

Molemmissa yrityksissä ymmärretään mainostamisen myyntiä kasvattava vaikutus. Jos Coca-Cola mainostaa omaa tuotettaan, mutta Pepsi ei, Coca-Colan markkinaosuus kasvaa 70 prosenttiin ja Pepsin vastaavasti vähenee 30 prosenttiin. Mainostamisen kustannus on kuitenkin 100 miljoonaa euroa. Coca-Colan myyntituotto on tällöin 600 miljoonaa euroa ja Pepsin 300 miljoonaa euroa. Tilanne on päinvastainen, jos Pepsi mainostaa tuotettaan, mutta Coca-Cola ei.

Sekä Coca-Colan että Pepsin johtajat tietävät, että ainoa keino vastata toisen yrityksen mainostukseen on mainostaa myös itse. Tällöin molempien markkinaosuudet tasoittuvat jälleen 50 prosenttiin, mutta molemmat yritykset joutuvat käyttämään 100 miljoonaa euroa mainostamiseen. Kummankin yrityksen myyntituotto on siis vain 400 miljoonaa euroa. Tämä on pelin Nashin tasapaino. Taulukon 4 pelimatriisista nähdään selvästi, että vaikka yhteistyö tuottaisi kokonaisuuden kannalta parhaan tuloman, yksittäisen pelaajan kannalta on houkuttelevaa poiketa kokonaisoptimaalisesta strategiasta.

Taulukko 4. Vangin dilemman sovellus kahden tuottajan kolajuomamarkkinoille. Pelin tulemat ovat myyntituottoja miljoonina euroina.

		Coca-Cola	
		ei mainosta	mainostaa
Pepsi	ei mainosta	500	300
	mainostaa	600	400

Vangin dilemma on symmetrinen peli, jossa kunkin strategian tulo riippuu vain muista valituista strategioista, eikä sillä, kuka strategiaa käyttää, ole merkitystä. Rangaistuspotkupeli puolestaan on epäsymmetrinen.

Yhteistoiminnallisissa peleissä pelaajat voivat solmia ulkopuolisen tahon valvomia sopimuksia (Shor 2005b). Pelit, joissa ulkopuolinen taho ei valvo sopimusten noudattamista, ovat ei-yhteistoiminnallisia (Shor 2005c).

Vakiosummapelissä yhden pelaajan hyöty on aina pois muilta pelaajilta (Shor 2005a). Vakiosummapeleihin viitattaessa puhutaan usein niiden erikoistapauksista, *nollasummapeleistä*. Esimerkiksi rangaistuspotkupeli on nollasummapeli, mutta vangin dilemma ei ole.

Kun kukin pelaaja tietää kaikkien pelaajien aikaisemmat valinnat, kuten šakissa, kyseessä on *täydellisen informaation* (engl. *perfect information*) peli (Policonomics 2012d). Vastaavasti korttipelissä, jossa pelaaja ei tiedä muiden pelaajien kortteja, tai rangaistuspotkupelissä, jossa laukoja ja maalivahti toimivat samanaikaisesti toistensa valinnoista tietämättöminä, informaatio on epätäydellistä.

*Täyden informaation* (engl. *complete information*) pelissä kukin pelaaja tietää kaikkien pelaajien *tyypit*, hyötyfunktiot, tulemat sekä strategiat (Policonomics 2012c). Tyypillinen esimerkki epätäyden informaation pelistä on huutokauppa, jossa huutajat eivät tiedä muiden huutajien myytävälle tuotteelle antamaa arvoa.

On huomattava, että käsitteet täydellisestä ja täydestä informaatiosta muistuttavat toisiaan, vaikka niillä on eri merkitykset. Englanninkieliset käsitteet *perfect information* ja *complete information* tunnutaan molemmat käännettävän joskus täydelliseksi informaatioksi (Estola 2008, s. 4; Pietikäinen 2005, s. 22). Tässä diplomityössä käytetään Jääskeläisen (2005, s. 35) esittämää täyden informaation käsitettä, kun viitataan englanninkieliseen termiin *complete information*.



## 3 Aikaisempi liikenneaiheinen tutkimus

### 3.1 Lentoliikenteen ja suurnopeusjunaliikenteen välisen kilpailun mallintaminen peliteorian avulla

Adler ym. (2010, s. 812–833) ovat analysoineet suurnopeusjuna- ja lentoliikenteen välisen kilpailun hyötyjä ja kustannuksia määrittelemällä rautatieliikennöitsijät, lentoyhtiöt sekä matkustajat pelaajiksi.

Lentoyhtiöitä on tutkimuksessa kahdentyyppisiä: kaupunkien välisiä suoria lentoja (engl. *point-to-point*) liikennöiviä halpalentoyhtiöitä sekä säteittäiskeskusverkostoa (engl. *hub-and-spoke*) käyttäviä perinteisiä lentoyhtiöitä. Halpalentoyhtiöt käyttävät kaikilla lennoilla samaa lentokonetyyppiä vähentääkseen kaluston ylläpidosta ja henkilöstön koulutuksesta syntyviä kustannuksia. Halpalentoyhtiöt eivät differoi hintojaan eri matkustajatyyppejen välillä, vaan valitsevat kiinteän hinnan kullekin reitille. Perinteiset lentoyhtiöt puolestaan valitsevat kullekin reitille sopivimman kaluston sekä differoivat hintansa liike- ja vapaa-ajanmatkustajille.

Rautatieliikennöitsijät valitsevat arvioimansa matkustajakysynnän mukaan kunkin reitin kaluston, liikennöintitiheyden sekä differoidut hinnat liike- ja vapaa-ajanmatkustajille.

Matkustajat valitsevat, matkustavatko he halpalento- vai perinteisen lentoyhtiön koneella vai junalla, vai jättävätkö he kokonaan matkustamatta.

Tutkimuksessa analysoitiin kolmea säteittäiskeskusverkostoa käyttävää perinteistä lentoyhtiötä (HS 1, HS 2 ja HS 3), kahta suoria lentoja tarjoavaa halpalentoyhtiötä (LC 1 ja LC 2) sekä yhtä suurnopeusjunaliikennöitsijää (HSR). Kullakin lentoyhtiöllä on oma liikenneverkkonsa ja keskuslentoasemansa. Perinteisten lentoyhtiöiden säteittäiskeskusverkoston rakenne määriteltiin lineaarisena optimointiongelmana.

Pelissä määritellään kunkin pelaajan kustannus- ja hyötyfunktiot sekä kokonais-hyvinvointifunktio, joka koostuu tuottajien, kuluttajien, julkisen talouden sekä väyläomaisuudenhaltijoiden yhteenlasketuista ylijäämistä. Peli ratkaistiin näiden epälineaaristen hyötyfunktioiden ja lineaaristen rajoitusehtojen avulla KNITRO-optimointiohjelmaa käyttäen.

Pelissä on neljä vaihtoehtoista kehityskulkua, jotka riippuvat siitä, parannetaanko osa Euroopan laajuisesta liikenneverkosta (TEN-T; engl. *Trans-European Transport Network*) suurnopeusjunaliikenteelle sopivaksi vai ei, sekä perittävän ratamaksun suuruudesta. Ratamaksut voivat perustua joko *rataverkolle pääsyn rajakustannukseen*, jolloin omaisuudenhaltijat joutuvat kattamaan osan väyläkustannuksista, tai keskimääräiseen kustannukseen, jolloin väyläkustannus kohdistuu pääasiassa junaliikennöitsijöille.

Tutkijat päättelivät, että parhaiten junaliikennöitsijän kanssa pystyvät kilpailemaan halpalentoyhtiö LC 2 sekä perinteinen lentoyhtiö HS 3. Junaliikennöitsijän kannalta parhaassa mahdollisessa kehityskulussa rataverkkoa parannetaan suurnopeusjunaliikenteelle soveltuvaksi ratamaksujen perustuessa rataverkolle pääsyn rajakustannukseen, jolloin lyhyet matka-ajat mahdollistavat lipunhintojen nostamisen. Jos ratamaksut perustuvat rataverkolle pääsyn keskimääräiseen kustannukseen, junaliikennöitsijä ei pysty toimimaan kannattavasti ilman subventiota. Koska lentoliikenteen *ulkoishaitat* ovat suurempia kuin junaliikenteessä, lentoliikenteen markkinaosuuden kasvaminen junaliikenteen kustannuksella ei ole kokonaishyvinvoinnin kannalta edullista.

Tutkimuksen mukaan suurin mahdollinen kokonaishyvinvointi saavutetaan parantamalla rataverkkoa ja pitämällä ratamaksut alhaisina, jotta kallis investointi saadaan mahdollisimman tehokkaaseen käyttöön.

### 3.2 Vakaan rataverkon suunnittelun peliteoreettinen mallintaminen

Laporte ym. (2010, s. 447–459) ovat käyttäneet peliteoriaa tutkiessaan rataverkon liikennöinnin vakautta. Heidän pelissään pelaajia ovat suunnittelija, käyttäjät sekä pahantahtoinen agentti, jota kutsutaan *demoniksi*. Peli on ei-yhteistoiminnallinen nollasummapeli, jossa on täydellinen informaatio.

Verkon sanotaan olevan vakaa, kun matkustajilla on enemmän kuin yksi mahdollinen reitti päästäkseen määränpäähänsä, jolloin verkon yksittäisen *kaaren* käyttökelvottomuuden haittavaikutus verkon toimintaan on pieni.

Suunnittelijan hyötyfunktion parametreja ovat verkon kattavuus sekä kokonaismatka-aika. Käyttäjät taas pyrkivät maksimoimaan omaa mukavuuttaan sekä minimoimaan matka-aikaa ja -kustannuksia. Arvaamaton demoni muiden muassa vaikuttaa sää- ja luonnonoloihin sekä saa ihmiset tekemään virheitä, mikä johtaa järjestelmän epäoptimaaliseen toimintaan.

Tutkijat olettavat, että rataverkko ei ruuhkaudu niin pahasti, että matka-ajat pitenevät, ja että käyttäjät valitsevat aina kokonaismatka-ajaltaan lyhyimmän reitin joko junalla tai muulla kulkutavalla. Koska käyttäjien toiminta on täysin determinististä, peli voidaan supistaa kahden pelaajan peliksi. Rataverkon käyttäjien määrä pyritään maksimoimaan ongelmatapauksessa.

Rataverkon suunnittelija valitsee käytettävän rataverkon  $r_i$  strategiajoukostaan  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_m\}$ , jossa on  $m$  puhdasta strategiaa. Demonin valitsee, mikä rataverkon kaaren  $e_j$  hän saattaa käyttökeltottomaksi strategiajoukostaan  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_j, \dots, e_n\}$ , jossa on  $n$  puhdasta strategiaa. Kun suunnittelija pelaa strategian  $r_i$  ja demoni strategian  $e_j$ , suunnittelijan tulema pelissä on  $\pi_{ij} = \pi(r_i, e_j)$ .

Nollasummapelissä pelaajien tulemat ovat aina toistensa vastalukuja, joten yhden pelaajan tulemien tarkasteleminen riittää. Suunnittelijan tulemamatriisi on

$$\mathbf{\Pi} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \dots & \pi_{1j} & \dots & \pi_{1n} \\ \pi_{21} & \pi_{22} & \dots & \pi_{2j} & \dots & \pi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi_{i1} & \pi_{i2} & \dots & \pi_{ij} & \dots & \pi_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi_{m1} & \pi_{m2} & \dots & \pi_{mj} & \dots & \pi_{mn} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Strategiapari  $(r^*, e^*)$  on pelin satulapiste, jos se toteuttaa epäyhtälön

$$\pi(r_i, e^*) \leq \pi(r^*, e^*) \leq \pi(r^*, e_j) \quad \forall r_i \in R, \quad \forall e_j \in E. \quad (3)$$

Tällöin  $\pi(r^*, e^*)$  on myös pelin Nashin tasapaino. Jos yhdelläkään puhtaalla strategiaparilla ei saavuteta Nashin tasapainoa, voidaan tarkastella sekastrategioita. Suunnittelija valitsee tällöin kunkin puhtaan strategian  $r_i$  todennäköisyydellä  $\beta_i$  siten, että

$$\sum_{i=1}^m \beta_i = 1. \quad (4)$$

Vastaavasti demoni valitsee kunkin puhtaan strategian  $e_j$  todennäköisyydellä  $\gamma_j$  siten, että

$$\sum_{j=1}^n \gamma_j = 1. \quad (5)$$

Suunnittelijan tulemamatriisi sekastrategioita käytettäessä on

$$\mathbf{\Pi}' = \begin{bmatrix} \beta_1 \gamma_1 \pi_{11} & \beta_1 \gamma_2 \pi_{12} & \dots & \beta_1 \gamma_j \pi_{1j} & \dots & \beta_1 \gamma_n \pi_{1n} \\ \beta_2 \gamma_1 \pi_{21} & \beta_2 \gamma_2 \pi_{22} & \dots & \beta_2 \gamma_j \pi_{2j} & \dots & \beta_2 \gamma_n \pi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_i \gamma_1 \pi_{i1} & \beta_i \gamma_2 \pi_{i2} & \dots & \beta_i \gamma_j \pi_{ij} & \dots & \beta_i \gamma_n \pi_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_m \gamma_1 \pi_{m1} & \beta_m \gamma_2 \pi_{m2} & \dots & \beta_m \gamma_j \pi_{mj} & \dots & \beta_m \gamma_n \pi_{mn} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Tutkimuksessa tarkastellaan yhdeksästä mahdollisesta solmusta ja kolmestatoista mahdollisesta kaaresta koostuvia verkostoja. Kunkin solmun  $i$  rakentamiskustannus on  $c_i$  ja kunkin kaaren  $ij$  rakentamiskustannus  $c_{ij}$ . Kaaren  $ij$  pituutta (tai yleistettyä matkakustannusta) kuvaa parametri  $d_{ij}$ . Probabilistisessa kehityskulussa suunnittelija valitsee verkon, joka maksimoi kaarten yhteispituuden odotusarvon, kun oletetaan verkon säilyvän kokonaisuudessaan käyttökelpoisena todennäköisyydellä  $\gamma_0 = 1/2$  ja yksittäisen kaaren tuhoutuvan todennäköisyydellä  $\gamma_j = 1/26$ . Verkon kokonaisrakentamiskustannus ei kuitenkaan saa ylittää jotakin ylärajaa  $c_{\max}$ . Suunnittelijan kannalta paras mahdollinen verkosto jokaisen kaaren ollessa käyttökelpoinen saadaan

optimointiongelma

$$\pi^* = \max_{r \in R} \left( \frac{1}{2} \pi(r) + \frac{1}{26} \sum_{e \in E} \pi(r, e) \right). \quad (7)$$

Stokastisessa kehityskulussa kunkin kaaren tuhoutumistodennäköisyys on tuntematon, joten ongelmaan etsitään *minimax*-ratkaisu. Tällöin löydetään kullekin strategialle huonoin mahdollinen lopputulos, joista valitaan paras, eli

$$\pi(r^*, e^*) = \max_{r \in R} \min_{e \in E} \pi(r, e). \quad (8)$$

Tutkijat tarkastelevat verkostoja, joiden kokonaispituus on vähintään 95 prosenttia parhaan mahdollisen verkoston kokonaispituudesta  $\pi^*$ . Suunnittelija pelaa kutakin tämän ehdon toteuttavaa strategiaa jollakin todennäköisyydellä siten, että demonin suurin mahdollinen aikaansaama tuho on mahdollisimman pieni.

Verkoston pituuden lisäksi ongelmaa tarkastellaan kokonaismatka-aikojen kannalta. Tässä tapauksessa suunnittelijan vaihtoehtoja ovat verkostot, joiden kokonaismatka-aika on enintään 105 prosenttia optimaalisesta kokonaismatka-ajasta. Menetelmällä saadaan eri ratkaisu kuin verkoston kattavuutta optimoimalla.

### 3.3 Maantien kustannusten kohdentaminen ei-atomisia pelejä soveltamalla

Castaño-Pardo ja Garcia-Diaz (1995, s. 187–203) ovat hyödyntäneet ei-atomisten pelien teoriaa tutkiessaan maantien rakentamis- ja kunnossapitokustannusten kohdentamista eri ajoneuvoluokille. Ei-atomisella pelillä tarkoitetaan peliä, jossa pelaajien määrä on suuri ja yksittäisen pelaajan vaikutus tulemaan vastaavasti pieni (Aumann ja Shapley 1968, s. v).

Tutkimuksessa käytettiin neljää ajoneuvoluokkaa, joista muodostettiin kaikki 16 mahdollista koalitiota. Kullekin koalitiolle määritettiin muun muassa akselipainoista riippuva kustannus. Koalition kustannuksen voidaan ajatella koostuvan koalitioon kuuluvien ajoneuvoluokkien rajakustannusten summasta.

Matemaattisesti kohtalaisen monimutkaisesta mallintamisesta saatiin tulos, jonka mukaan kustannukset on reiluinta kohdentaa suoraan akselipainojen mukaan.

### 3.4 Ruuhkautumisen ja hinnoittelun mikrotaloustieteellinen perusta peliteorian näkökulmasta

Levinson (2005, s. 691–704) on analysoinut autoliikenteen ruuhkautumista mikroil-

miönä, jossa yksilön valinta vaikuttaa lopputulokseen. Tutkimuksessa oletetaan, että

- pelaajat ovat rationaalisia autoilijoita, joiden tavoite on matka-ajan viipeestä, aikatauluviipeestä sekä hinnasta koostuvan kokonaiskustannuksen minimointi
- rationaalisuudesta vallitsee yleinen tietämys (engl. *common knowledge of rationality*): kaikki tietävät, että kaikki ovat rationaalisia; kaikki tietävät, että kaikki tietävät, että kaikki ovat rationaalisia; kaikki tietävät, että – – kaikki tietävät, että kaikki ovat rationaalisia
- pelaajien uskomukset ovat johdonmukaisia keskenään (engl. *consistent alignment of beliefs*): kaikki pelaajat toimivat samassa tilanteessa samoin, eikä kukaan näin ylläty toisen pelaajan valinnasta
- pelaajilla on täysi informaatio muiden pelaajien strategioista ja tulemista, mikä vastaa todellisuutta ruuhkautumisen ollessa toistuvaa eikä esimerkiksi yllättävästä onnettomuudesta aiheutuvaa.

Matka-ajan viipeellä tarkoitetaan ruuhkautumisen aiheuttamaa matka-ajan kasvua, kun taas aikatauluviipeellä tarkoitetaan ruuhka- ja ihannetilanteiden lähtö- tai saapumisaikojen erotusta.

Peli on vangin dilemman muunnos, jossa pelaajat toimivat itsekkäästi, eivätkä siksi päädy Pareto-optimaaliseen tulemaan. Jos vangin dilemmaa pelataan toistuvasti, pelaajat voivat kuitenkin päätyä tekemään yhteistyötä. Tämä onnistuu esimerkiksi ”samalla mitalla takaisin” -strategialla (engl. *tit-for-tat*), jossa pelaaja tekee yhteistyötä ensimmäisellä kierroksella, minkä jälkeen hän toimii aina samoin kuin vastapelaaja edellisellä kierroksella (Axelrod ja Hamilton 1981, s. 1393). Koska ruuhkautumiseen vaikuttavia seikkoja on lukuisia, Levinson olettaa, että pelin toistuminen ei yksin riitä yhteistyön toteutumiseen, vaan tarvitaan myös oikeanlaisia ulkoisia kannustimia tai valvontamekanismeja.

Pelaajat valitsevat, lähtevätkö he matkaan ennenaikaisesti ( $s = E$ ; engl. *early*), suunnitellun aikataulun mukaisesti ( $s = O$ ; engl. *on-time*) vai myöhään ( $s = L$ ; engl. *late*). Jos pelaajat lähtevät matkaan samanaikaisesti, syntyy ruuhka, jonka seurauksena pelaaja kärsii matka-ajan viipeestä todennäköisyydellä  $1/2$ . Taulukoissa 5 ja 6 esitetään peli normaalinuotoisena.

Taulukko 5. Kahden pelaajan ruuhkapeli. Ruuhkatilanteita kuvaavia strategiapareja, jolloin  $s_1 = s_2$ , lukuun ottamatta peli on symmetrinen. Ruuhkatilanteessa pelaaja 1 edustaa ruuhkasta ensimmäisenä selvinnyttä autoilijaa ja pelaaja 2 ruuhkan haitat kärsivää autoilijaa. Kaikki tulemat ovat kustannuksia, joten pelaajat pyrkivät minimoimaan oman tulemansa.

		Pelaaja 2		
		$E$	$O$	$L$
Pelaaja 1	$E$	$e$	$e$	$e$
	$O$	$0$	$0$	$0$
	$L$	$l$	$l$	$l$

Taulukko 6. Ruuhkapelin tulemien odotusarvot, kun pelaajalle koituu matka-ajan viive todennäköisyydellä  $1/2$ . Kaikki tulemat ovat kustannuksia, joten pelaajat pyrkivät minimoimaan oman tulemansa.

		Pelaaja 2		
		$E$	$O$	$L$
Pelaaja 1	$E$	$\frac{1}{2}(e+d)$	$e$	$e$
	$O$	$0$	$\frac{1}{2}(d+l)$	$0$
	$L$	$l$	$l$	$l$

Pelaajalle koituva kustannus ennenaikaisesta saapumisesta (engl. *early*) on  $e$ , myöhäisestä perille saapumisesta (engl. *late*)  $l$  ja matka-ajan viipeestä (engl. *delay*)  $d$ . Erittäin myöhäisestä perille saapumisesta, kuten tilanteessa  $s_1 = s_2 = L$ , koituva kustannus on  $2l$ .

Sopivien arvojen löytäminen kustannuksille  $e$ ,  $d$  ja  $l$  vaatisi empiiristä tutkimusta. Analyysissä pohdittiin kahta vaihtoehtoista tilannetta: joko  $e = 1$ ,  $d = 2$  ja  $l = 3$ ; tai  $e = 3$ ,  $d = 1$  ja  $l = 4$ . Ensimmäisessä tapauksessa Nashin tasapaino on strategiapari  $(s_1, s_2) = (E, O)$ , jolloin tulemat ovat  $\pi_1(E, O) = 0$  ja  $\pi_2(E, O) = 1$ . Symmetrisyyden takia myös  $(s_1, s_2) = (O, E)$  on Nashin tasapaino. Tällöin tulemat ovat  $\pi_1(O, E) = 1$  ja  $\pi_2(O, E) = 0$ .

Toisessa tapauksessa Nashin tasapaino saavutetaan ruuhkatilanteessa  $(s_1, s_2) = (O, O)$ , jonka tulemat ovat  $\pi_1(O, O) = 2,5$  ja  $\pi_2(O, O) = 2,5$ . Tulos ei ole Pareto-optimaalinen, joten sen voidaan perustellusti sanoa olevan sosiaalisesti epäoptimaalinen. Ongelma yritetään ratkaista tiemaksun avulla.

Tiemaksua peritään vain ruuhkatilanteissa. Tiemaksu on  $\tau_E$  molempien lähtiessä ennenaikaisesti,  $\tau_O$  molempien lähtiessä suunnitellun aikataulun mukaisesti ja  $\tau_L$  molempien lähtiessä myöhään. Tiemaksujen vaikutus peliin näkyy taulukossa 7.

Taulukko 7. Ruuhkapelin tulemien odotusarvot, kun ruuhkassa ajavilta autoilijoilta peritään tiemaksu. Kaikki tulemat ovat kustannuksia, joten pelaajat pyrkivät minimoimaan oman tulemansa.

		Pelaaja 2			
		$E$	$O$	$L$	
Pelaaja 1	$E$	$\frac{1}{2}(e+d)+\tau_E$	$e$	$e$	$\frac{1}{2}(e+d)+\tau_E$
	$O$	$0$	$\frac{1}{2}(d+l)+\tau_O$	$0$	$\frac{1}{2}(d+l)+\tau_O$
	$L$	$l$	$l$	$\frac{1}{2}d+\frac{3}{2}l+\tau_L$	$\frac{1}{2}d+\frac{3}{2}l+\tau_L$

Ruuhkan yhteiskunnallinen kustannus on  $C$ , kullekin autoilijalle koituva kustannus  $c$  ja autoilijoiden määrä  $q$ . Tällöin yhteiskunnallinen (diskreetti) rajakustannus on

$$C_m = \frac{\Delta C}{\Delta q} \quad (9)$$

ja autoilijalle  $i$  koituva (diskreetti) rajakustannus

$$c_m = \frac{\Delta c}{\Delta q}. \quad (10)$$

Optimaalinen tiemaksu on

$$\tau = \max \{C_m - c_m, 0\}. \quad (11)$$

Eri ruuhkatilanteiden tiemaksuiksi saadaan

$$\tau_E = \max \left\{ \frac{1}{2}(d-e), 0 \right\}, \quad (12)$$

$$\tau_O = \frac{1}{2}(l+d) \text{ ja} \quad (13)$$

$$\tau_L = \frac{1}{2}(l + d). \quad (14)$$

Tiemaksujen avulla jompikumpi autoilija saadaan lähtemään matkaan ennenaikaisesti toisen lähtiessä suunnitellun aikataulun mukaisesti, jolloin ruuhkaa ei pääse syntymään, ja autoilijoille koituvien kustannusten summa on pienempi kuin ilman tiemaksuja.

Lopuksi peliin lisättiin yksi pelaaja. Tässä mallissa yksi kolmesta pelaajasta voi kärsiä kahden muun pelaajan valintojen aiheuttamista ylivuotovaikutuksista (engl. *spillover effect*). Jos esimerkiksi kaksi pelaajaa lähtee matkaan strategialla  $O$ , epäitsekkäästi strategian  $L$  valitseva kolmas pelaaja kärsii muiden aiheuttamasta ruuhkasta.

Tutkimuksen tulokset ovat intuitiivisesti uskottavia ja yhdenmukaisia kysynnän ja tarjonnan lain kanssa. Kun hyödykkeen, kuten väyläkapasiteetin, hinta on vakio, hyödykkeen kysytty määrä voi kasvaa tarjontaa suuremmaksi, jolloin hyödykkeestä on pulaa (Investopedia, LLC 2017).

Levinsonin ja Januschin tekemät korjaukset tutkimusraporttiin on julkaistu vuonna 2015.

Janusch (2016, s. 95–103) on lisäksi huomauttanut, että pelin tiemaksut aiheuttavat moraalikadon riskin. Jos tiemaksuina kerätyt varat jaetaan pelaajien kesken, pelaajalle syntyy kannustin olla ruuhkan ”uhri”, koska siitä maksetaan.

### 3.5 Kaupunki-infraomaisuudenhallinnan toimintojen agenttiperusteinen simulointi

Osman (2012, s. 45–57) on simuloinut infraomaisuudenhallintaan vaikuttavia toimintoja agentteina, jotka tekevät valintoja. Vaikka tutkimuksessa ei sitä suoranaisesti mainita, kyse on peliteoriasta. Tutkimuksen agentteja ovat omaisuudenhaltijat, käyttäjät sekä päättäjät.

Omaisuudenhaltijoiden tavoitteita ovat omaisuuden fyysisen kunnon parantaminen, operationaalisten riskien vähentäminen ja valitusten määrän vähentäminen.

Käyttäjien tavoitteita ovat palvelun laadun parantaminen, palvelun luotettavuuden parantaminen sekä toiveisiinreagoinnin parantaminen.

Päättäjien tavoitteita ovat käyttäjien valitusten määrän minimoiminen, määrärahan kasvattamisen minimoiminen, investointien houkutteleminen, tuhoisien toimintahäiriöiden ennaltaehkäiseminen sekä järjestelmän turvallisuuden parantaminen.

Palvelun laatu on käyttäjän näkökulmasta subjektiivista ja se riippuu hänen oloistaan. Yksittäisen käyttäjän tyytyväisyys palvelutasoon voidaan määritellä



kaavalla

$$Q = \sum_i (P_i - E_i), \quad (15)$$

missä

$Q$  on yksittäisen käyttäjän tyytyväisyys kokonaispalvelutasoon,

$P_i$  hänen osa-alueella  $i$  kokemansa palvelutaso ja

$E_i$  hänen osa-alueelta  $i$  odottamansa palvelutaso.

Käyttäjä valittaa, jos hänen kumulatiivinen palvelukokemuksensa jää hänen riskitoleranssiaan huonommaksi.

Tutkimuksessa oletetaan, että mitä enemmän käyttäjä  $i$  tarvitsee jotakin infraomaisuuden osaa, sitä pienempi on hänen riskitoleranssinsa häiriöitä kohtaan. Palvelun laadun pysyessä toleranssirajan paremmalla puolella käyttäjä ei välttämättä edes ajattele käyttävänsä mitään palvelua, koska hän saattaa pitää sitä selviönä. Käyttäjien tyytymättömyys ei kuitenkaan ilmene aivan pienimmistä ongelmista, kuten yksittäisistä tien päällystevaurioista. Palvelun laadun häiriöitä pystytään kompensoimaan paremmilla palvelukokemuksilla, mutta huonon kokemuksen paino on hyvän kokemuksen painoa suurempi.

Päällysteen kunnon heikkeneminen oletetaan Markovin ketjuksi<sup>1</sup>, jota kuvaa matriisi

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,85 & 0,15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,75 & 0,25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Tutkimuksesta pääteltiin, että oikeiden oletusten ja parametrien arvojen avulla agenttiperusteinen mallintaminen mahdollistaa takaisinkytkentämekanismien sisällyttämisen infraomaisuudenhallintamalleihin, jolloin voidaan saavuttaa parempi lopputulos kuin perinteisellä omaisuuskeskeisellä infraomaisuudenhallinnalla.

### 3.6 Tien suorituskyvyn hallinnan peliteoreettinen malli

Osman ja Nikbakht (2014, s. 40–54) ovat kuvanneet tieomaisuudenhallintaa päättäjien, omaisuudenhaltijoiden ja tienkäyttäjien välisenä pelinä. Pelaajien tavoitteet, mahdolliset strategiat sekä strategianvalintahetket kuvataan taulukossa 8.

---

<sup>1</sup> Markovin ketjun käsite selitetään lyhyesti luvussa 4.5.

Taulukko 8. Tieomaisuudenhallintapelin pelaajien tavoitteet, strategiat ja strategianvalintavuorot.

	Tavoitteet	Strategiat	Valintavuorot
<b>Päättäjät</b>	Kunnossapidon kokonaiskustannusten minimointi	Määrärahan lisääminen	Vuodet 2, 3 ja 4
	Käyttäjien valitusten määrän minimointi	Määrärahan vähentäminen	
<b>Omaisuu-den-haltijat</b>	Tieverkon pitkän aikavälin kokonaiskuntoarvon maksimointi	Kunnossapitostrategia <i>A</i>	Vuodet 1 ja 3
		Kunnossapitostrategia <i>B</i>	
<b>Tienkäyttäjät</b>	Tieverkon palvelutason lyhyen aikavälin maksimointi	Valittaminen	Vuodet 1, 2 ja 3
		Valittamatta oleminen	

Mallissa päättäjät, joiden toimikausi on neljä vuotta, päättävät tiemäärärahan suuruudesta jokaisen vuoden alussa toimikauden ensimmäistä vuotta lukuun ottamatta. Omaisuu-denhaltijoiden kunnossapitostrategia *A* on vaurioita ennaltaehkäisevä: suurin osa määrärahasta käytetään teihin, jotka eivät ole vielä vaurioituneet pahasti. Kunnossapitostrategiassa *B* puolestaan painotetaan kaikkein huonoimmassa kunnossa olevien teiden korjausta. Omaisuu-denhaltijat valitsevat kunnossapitostrategiansa päättäjien jokaisen toimikauden ensimmäisenä ja kolmantena vuotena. Tienkäyttäjät voivat valittaa tieverkon palvelutasosta jokaisen vuoden lopussa päättäjien toimikauden viimeistä vuotta lukuun ottamatta.

Pelin kaikkien mahdollisten strategiayhdistelmien määrä on

$$n = \prod_{i=1}^m x_i \quad (17)$$

missä

$n$  on pelin siirtoyhdistelmien määrä,

$x_i$  siirron  $i$  strategiavaihtoehtojen määrä ja

$m$  pelivaiheiden määrä.

Koska peli koostuu yhteensä kahdeksasta vaiheesta, joissa kullakin pelaajalla on kaksi vaihtoehtoa,  $x_1 = x_2 = \dots = x_8 = 2$ . Täten pelin siirtoyhdistelmien määrä on  $n = 2^8 = 256$ . Yhdistelmien määrä vähennettiin 160:een yksinkertaistamalla peliä olettamalla, että

- jos tienkäyttäjät valittavat toisessa vaiheessa, ja päättäjät vähentävät määrärahaa kolmannessa vaiheessa, tienkäyttäjät valittavat myös neljännessä vaiheessa
- jos tienkäyttäjät eivät valita toisessa vaiheessa, ja päättäjät lisäävät määrärahaa kolmannessa vaiheessa, tienkäyttäjät eivät valita myöskään neljännessä vaiheessa
- jos tienkäyttäjät valittavat toisessa ja neljännessä vaiheessa, päättäjät lisäävät määrärahaa viidennessä vaiheessa.

Pelin tulemien laskemiseen käytetään tienkuntomallia ja Markov-pohjaista määrärahanoptimointimallia. Tieverkon jakoa kuntoluokkiin hetkellä  $t$  estimoi vektori

$$\mathbf{u}^{(t)} = \mathbf{u}^{(0)} \mathbf{P}^t, \quad (18)$$

missä

$\mathbf{u}^{(0)}$  on tieverkon kuntoluokkavektori alkuhetkellä,  
 $\mathbf{P}$  tieverkon kunnan heikkenemistä kuvaava matriisi ja  
 $t$  aika-askelten määrä.

Verkon korjaustoimenpiteitä kuvaa vektori

$$\mathbf{r} = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4 \ r_5], \quad (19)$$

missä

$r_i$  on kuntoluokan  $i$  teiden korjattava osuus.

Korjauskustannuksia kuvaa vektori

$$\mathbf{c} = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4 \ c_5], \quad (20)$$

missä

$c_i$  on yhden tiekilometrin korjauskustannus kuntoluokassa  $i$ .

Kunnossapitokustannuksia kuvaa vektori

$$\mathbf{m} = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4 \ m_5], \quad (21)$$

missä

$m_i$  on yhden tiekilometrin kunnossapitokustannus kuntoluokassa  $i$ .

Aika-askelen  $t$  kokonaiskustannus on

$$C^{(t)} = \sum_{i=1}^5 u_i^{(t)} (c_i r_i + m_i). \quad (22)$$

Optimointimallilla minimoidaan aika-askelen  $t$  määrärahaylijäämää

$$s^{(t)} = b^{(t)} - C^{(t)}. \quad (23)$$

missä

$b^{(t)}$  on aika-askelen  $t$  määräraha.

Tienkäyttäjien ja päättäjien hyötyjä mallinnetaan eksponentiaalisella hyötyfunktioilla, joka on Clemenin ja Reillyn (2001, s. 543) mukaan muotoa

$$U(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{R}\right), \quad (24)$$

missä

$U$  on pelaajan hyöty,

$x$  pelin tulema ja

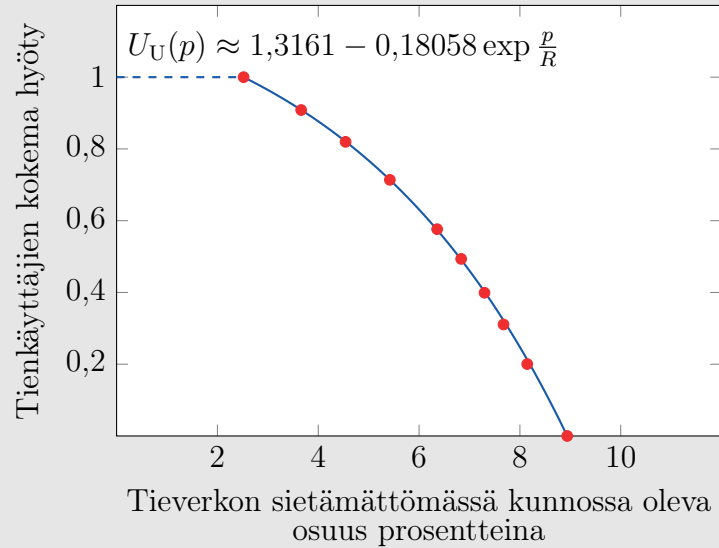
$R$  pelaajan riskitoleranssi.

Riskitoleranssi  $R$  on pelaajan *riskiaversiosta* riippuva parametri. Mitä vähemmän pelaaja sietää riskiä eli epävarmuutta, sitä pienempi hänen riskitoleranssinsa on, ja sitä enemmän hänen hyötyfunktionsa kaareutuu alaspäin (Clemen ja Reilly 2001, s. 543). Vastaavasti hyötyfunktio on vakio, kun  $R \rightarrow \infty$ .

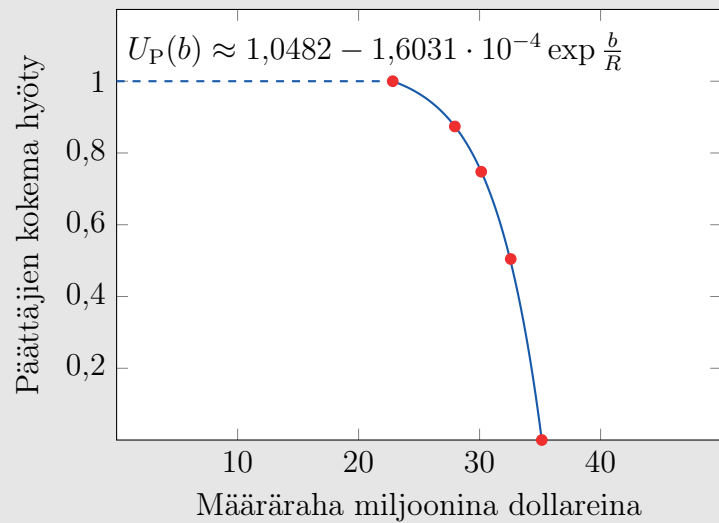
Tässä diplomityössä havaittiin, että funktio (24) ei voi sellaisenaan vastata Osmanin ja Nikbakhtin (2014, s. 49) esittämiä hyötyfunktioiden graafisia kuvauksia, koska funktio (24) on kasvava. Oletetaan hyötyfunktioiden sen sijaan olevan muotoa

$$U(x) = k_1 - k_2 \exp \frac{x}{R}, \quad (25)$$

missä  $k_1$  ja  $k_2$  ovat positiivisia vakioita, jotka voidaan ratkaista Osmanin ja Nikbakhtin kuvaajista graafisesti. Tienkäyttäjien hyötyfunktion vakioiksi saadaan  $k_1 \approx 1,3161$  ja  $k_2 \approx 0,18058$ ; päättäjien hyötyfunktion  $k_1 \approx 1,0482$  ja  $k_2 \approx 1,6031 \cdot 10^{-4}$ . Näin saadut hyötyfunktiot esitetään kuvissa 4 ja 5 sinisellä. Kuvista nähdään, että funktiot vastaavat hyvin Osmanin ja Nikbakhtin kuvaajista graafisesti ratkaistuja punaisia havaintopisteitä.



Kuva 4. Tienkäyttäjien hyöty  $U_U$  tieverkon sietämättömässä kunnossa olevan prosenttiosuuden  $p$  funktiona, kun heidän riskitoleranssikseen oletetaan  $R = 4,5 \%$ .



Kuva 5. Päättäjien hyöty  $U_P$  määrärahan  $b$  funktiona, kun heidän riskitoleranssikseen oletetaan  $R = 4\,000\,000$  \$.

Tienkäyttäjien ja päättäjien hyötyfunktiot ovat moniattribuuttisia: kokonaishyöty on kunkin osa-alueen hyötyvaikutuksen kertoimilla painotettu keskiarvo.

Tienkäyttäjien hyötyyn vaikuttavat attribuutit ovat polttoaineenkulutus ja tieverkon

kunto:

$$U_U = \frac{1}{2}U_f + \frac{1}{2}U_c. \quad (26)$$

Päättäjien hyötyyn vaikuttavat määrärahan suuruus, työmäärä sekä tienkäyttäjien tyytyväisyys:

$$U_P = \frac{3}{10}U_b + \frac{3}{10}U_w + \frac{2}{5}U_s. \quad (27)$$

Tutkittavan tieverkon kaistapituus on 3 000 km. Ensimmäisenä vuonna päättäjien oletetaan valitsevan määrärahasi  $b_1 = 8\,000\,000$  \$.

Tutkimuksen päätarkoitus ei ole pelin tasapainopisteiden löytäminen, koska puhtailla strategioilla pelattaessa Nashin tasapainoa ei välttämättä edes ole olemassa. Sen sijaan pyritään eliminoimaan dominoidut strategiat ja rajaamaan mahdollisiksi vaihtoehtoiksi vain ne, jotka hyödyttävät kaikkia pelaajia. Tutkijoiden mukaan omaisuudenhaltijoiden kannattaa aina valita kunnossapitostrategia  $A$ . Päättäjien kannattaa lisätä määrärahaa ensimmäisessä vaiheessa, vähentää toisessa ja lisätä kolmannessa. Ensimmäisessä vaiheessa käyttäjien valittamisella ei ole merkitystä, mutta kahdessa seuraavassa vaiheessa heidän kannattaa olla valittamatta. Päättäjien hyöty on suurempi, jos käyttäjät eivät valita ollenkaan, mutta koska tämä ei vaikuta käyttäjiin itseensä, he valittavat ensimmäisessä vaiheessa todennäköisyydellä  $1/2$ .

Tutkijat huomauttavat, että ei ole täysin realistista olettaa, että pelissä vallitsisi täysi informaatio.

### 3.7 Yhteenveto tutkimuksista

Aikaisempien tutkimusten perusteella vaikuttaa siltä, että peliteoriaa on käytetty liikenne- ja tietekniikan aloilla vain vähän. Sillä on kuitenkin useita erilaisia sovellustapoja. Väyläomaisuudenhallinnan kannalta tutkimuksista kiinnostavimpia ovat ne, joissa analysoidaan omaisuudenhaltijoiden, päättäjien, käyttäjien tai asiakkaiden päätöksentekoa. Peleistä tulee helposti laajoja ja monimutkaisia, mutta niitä pystytään myös yksinkertaistamaan peli- ja ratkaisukelpoisiksi. Yksinkertaistaminen vaatii joskus rohkeitakin oletuksia, joiden realistisuuteen on suhtauduttava kriittisesti. Herkkyy- ja virhetarkastelut ovat siksi tärkeitä. Rajoittavien oletusten tekeminen on melko tyypillistä myös taloustieteessä, jossa peliteoriaa käytetään paljon.

## 4 Omaisuudenhallinnan päätöksenteko pelinä

### 4.1 Tausta

Tämän diplomityön peli pohjautuu osittain luvussa 3 kuvailtuihin Osmanin (2012, s. 45–57) sekä Osmanin ja Nikbakhtin (2014, s. 40–54) artikkeleihin, joissa tieomaisuudenhallintaa kuvataan päättäjien, omaisuudenhaltijoiden sekä tienkäyttäjien välisenä pelinä.

Rautateiden tavaraliikenteessä kolmas pelaaja on tienkäyttäjäjoukon sijaan kuljetusten tarvitsijoiden joukko, joka haluaa järjestää kuljetukset mahdollisimman halvalla.

Jotta pelaajat voivat arvioida tapahtumakulkuja ja vaikutuksia, he tarvitsevat riittävästi luotettavia lähtötietoja ainakin junakalustosta, rataverkon kunnosta, kuljetus-, investointi- ja kunnossapitokustannuksista sekä kuljetusten kysynnästä.

### 4.2 Lähtötiedot ja oletukset

#### 4.2.1 Kuljetusten tarvitsijoiden näkökulma

Rautatiekuljetusten yksikkökustannukset ovat sitä pienemmät, mitä vähemmän junakalustoa tavarankuljettamiseen tarvitaan. Tarvittavan junakaluston määrä riippuu radalla sallituista akselipainoista. Junille on myös määritelty suurin sallittu pituus, joten ainoa tapa kasvattaa yhdellä junalla kuljetettavan tavarankuljetuksen määrää on nostaa sallittuja akselipainoja.

Sähköisen tavarajunaliikenteen kustannukset voidaan jakaa aikaperusteisiin ja matkaperusteisiin kustannuksiin, jotka riippuvat veturien määrästä  $l$ , vaunujen määrästä  $w$ , matkan pituudesta  $d$  ja matka-ajasta  $t$  (Iikkanen 2013, s. 37–39). Aikaperusteiset kustannukset ovat

$$c_t = t \cdot (235 \text{ €/h} + (l - 1) \cdot 122 \text{ €/h} + w \cdot 2,05 \text{ €/h}). \quad (28)$$

Matkaperusteiset kustannukset, joihin sisältyy vaihtotyön kustannus, ovat

$$c_d = d \cdot (l \cdot 1,39 \text{ €/km} + w \cdot (0,10 \text{ €/km} + 0,29 \text{ €/km})). \quad (29)$$

Näiden lisäksi kuljetuksista peritään rataveroa ja ratamaksua, jotka ovat yhteensä

$$\tau = d \cdot (l \cdot 0,15 \text{ €/km} + w \cdot 0,10 \text{ €/km}). \quad (30)$$

Kokonaiskustannus voidaan kirjoittaa muodossa

$$\begin{aligned} c &= c_t + c_d + \tau \\ &= t \cdot (113 \text{ €/h} + l \cdot 122 \text{ €/h} + w \cdot 2,05 \text{ €/h}) + \\ &\quad d \cdot (l \cdot 1,54 \text{ €/km} + w \cdot 0,49 \text{ €/km}). \end{aligned} \quad (31)$$

Kustannusfunktion (31) yksikköhinnat ovat vuoden 2012 indeksissä (Iikkanen 2013, s. 37–39). Oletetaan tällä tarkoitettavan vuoden 2012 maarakennuskustannusindeksin (MAKU) vuosikeskiarvoa, joka oli 135,49 vuoden 2005 indeksin ollessa 100 (Suomen virallinen tilasto 2017b). Vuoden 2017 kesäkuun indeksiin 134,5 muunnettuna kustannusfunktio on

$$\begin{aligned} c &= t \cdot (112,17 \text{ €/h} + l \cdot 121,11 \text{ €/h} + w \cdot 2,04 \text{ €/h}) + \\ &\quad d \cdot (l \cdot 1,53 \text{ €/km} + w \cdot 0,49 \text{ €/km}). \end{aligned} \quad (32)$$

Suomen rataverkko on jaettu kuormituskapasiteettinsa<sup>2</sup> mukaan standardissa SFS-EN 15528 määriteltäviin rataluokkiin C4, D4 ja E4, joiden yhteispituudet esitetään taulukossa 9 (Liikennevirasto 2016a, liite 6).

Taulukko 9. Kunkin rataluokan ratojen suurin sallittu akselipaino sekä yhteispituus ja suhteellinen osuus koko rataverkon pituudesta vuonna 2015 (Liikennevirasto 2016a, liite 6; SFS-EN 15528, s. 24–25).

Rataluokka	Akselipaino	Yhteispituus	Osuus rataverkosta
C4	200 kN	789 km	13,7 %
D4	225 kN	4 587 km	79,4 %
E4	250 kN	403 km	7,0 %

Kuljetusten tarvitsijoiden valitsemaa strategiaa kuvaa kuljetusmäärävektori  $\mathbf{Q}$ . Olkoot yleisesti rataluokkaan E4 kuuluvien rataosuuksien liikennemäärä  $Q_E$ , rataluokkaan D4 kuuluvien osuuksien  $Q_D$  ja rataluokkaan C4 kuuluvien  $Q_C$ , jotka ovat vektorin  $Q$  komponentteja. Kuljetusten tarvitsijoiden hyöty  $u_K$  on oletettavasti sitä suurempi, mitä enemmän he pystyvät käyttämään parempikuntoisia rataosuuksia kuljetuksiinsa.

Olkoot rataosat X ja Y kuvitteellisia 100 kilometrin pituisia yksiraiteisia rataosia, joista rataosa X kuuluu rataluokkaan C4 ja rataosa Y luokkaan D4. Molemmilla on pelkästään tavaraliikennettä, ja vuotuinen bruttokuormitus on 5,0 miljoonaa tonnia. Kummankin rataosan suurin sallittu nopeus on 80 km/h. Yksiraiteisuuden takia junat joutuvat kuitenkin pysähtelemään usein, joten keskinopeus on vain 60 km/h. Matka-aika kummallakin radalla on siis 1 h 40 min.

<sup>2</sup> Kuormituskapasiteetti ilmoitetaan standardissa tonneina, ei kilonewtoneina. Yhden tonnin akselimassalla tarkoitetaan kuitenkin yleisesti akselipainoa 10 kN (Kiuru 2007, s. 13–14).



Molemmilla kuvitteellisilla radoilla liikennöidään 24 neliakselisen vaunun tavarajunia, joiden omamassa on  $m_w = 25 \text{ t}$  (Iikkanen 2013, s. 27). Vaunuja vedetään kahdella Sr2-sähköveturilla. Veturin massa on  $m_l = 83 \text{ t}$  (Iikkanen 2013, s. 26). Yhden tällaisen junan yhden matkan liikennöintikustannus on

$$\begin{aligned} c &= t \cdot (112,17 \text{ €/h} + l \cdot 121,11 \text{ €/h} + w \cdot 2,04 \text{ €/h}) + \\ &\quad d \cdot (l \cdot 1,53 \text{ €/km} + w \cdot 0,49 \text{ €/km}) \\ &= \left(1 + \frac{40}{60}\right) h \cdot (112,17 \text{ €/h} + 2 \cdot 121,11 \text{ €/h} + 24 \cdot 2,04 \text{ €/h}) + \\ &\quad 100 \text{ km} \cdot (2 \cdot 1,53 \text{ €/km} + 24 \cdot 0,49 \text{ €/km}) \\ &\approx 2\,145 \text{ €}. \end{aligned} \quad (33)$$

Vaunun suurin mahdollinen kokonaismassa on neljä kertaa akselimassan suuruinen. Kun kokonaismassasta vähennetään omamassa, saadaan vaunun suurin mahdollinen nettokuorma. Koska junan liikennöintikustannus ei mallin mukaan riipu junan nettokuormasta, kuljetusten yksikköhintaa  $P$  voidaan vähentää nostamalla suurinta sallittua akselipainoa. Liikennevirastolla onkin tavoite mahdollistaa 250 kN:n akselipaino merkittävällä osalla radoista (Kiuru ym. 2015, s. 27). Suuremman akselipainon ansiosta voidaan myös vähentää junan vaunumäärää, mikä parantaa rataverkon välityskykyä.

Tilastoinnin mukaan vuoden 2016 rautatieliikenteessä 47 prosenttia tavaravaunuista kulki tyhjinä (sähköpostiviesti 25.10.2017). Kuormattuina kulkevien vaunujen kuormausasteesta ei saatu tarkkaa tietoa, mutta sitä voitaneen arvioida tieliikenteen tavarakuljetusten kuormausasteiden perusteella, koska kuormausaste riippunee ensisijaisesti kuljetettavan tavarantoiminnan – eikä kuljetuskaluston – ominaisuuksista. Vuonna 2016 tieliikenteen tavarakuljetusten kuormausaste oli 69 prosenttia (Suomen virallinen tilasto 2017a, s. 12).

Oletetaan siis, että yhden kuormatun tavaravaunun nettokuorma  $m_f$  on keskimäärin 69 prosenttia radan suurimman sallitun akselipainon mahdollistamasta nettokuormasta. Näin voidaan arvioida junien keskimääräistä nettokuormaa ja kuljetusten yksikköhintaa, jotka esitetään rataluokittain taulukossa 10.

Taulukko 10. Tavarajunien keskimääräisiä ominaisuuksia rataluokittain.

Rata-luokka	Vaunun kok.massa	Junan kok.massa	Junan nettokuorma	Kuljetusten yksikköhinta
C4	80 t	1 249 t	483 t	4,44 €/t
D4	90 t	1 336 t	570 t	3,76 €/t
E4	100 t	1 424 t	658 t	3,26 €/t

Akselipainojen nostamisella voidaan siis vähentää kuljetuskustannuksia jopa 13–27 prosenttia. Suurilla kuljetusmäärillä saatavat kustannussäästöt voivat kasvaa

merkittäviksi, joten pelaaminen on selvästi kiinnostavaa kuljetusten tarvitsijoiden näkökulmasta. Tavarakuljetusten tarvitsijoita saattaa olla useita, mutta koska heidän kaikkien oletetaan toimivan kustannuksia minimoiden, heidät ajatellaan yhdeksi pelaajaksi.

Rataosalla kuljetettavan tavarankuorman nettomäärä riippuu junan nettokuormasta  $N$ , junan keskimääräisestä massasta  $M$  ja rataosan bruttokuormituksesta  $Q_b$ . Alkutilanteessa kuljetettavan tavarankuorman nettomäärä on rataluokkaan C4 kuuluvalla rataosalla X

$$\begin{aligned} Q_{X1} &= \frac{N_C}{M_C} Q_b \\ &= \frac{483 \text{ t}}{1\,249 \text{ t}} \cdot 5\,000\,000 \text{ t} \\ &= 1\,932\,869 \text{ t} \\ &\approx 1\,930\,000 \text{ t} \end{aligned} \tag{34}$$

ja rataluokkaan D4 kuuluvalla rataosalla Y

$$\begin{aligned} Q_{Y1} &= \frac{N_D}{M_D} Q_b \\ &= \frac{570 \text{ t}}{1\,336 \text{ t}} \cdot 5\,000\,000 \text{ t} \\ &= 2\,134\,289 \text{ t} \\ &\approx 2\,130\,000 \text{ t}. \end{aligned} \tag{35}$$

Kysynnän ja tarjonnan lain mukaan tavarakuljetusten kysytty määrä kasvaa kustannusten vähentyessä, joten kuljetusten tarvitsijoiden voidaan olettaa valitsevan suurempia kuljetusmääriä, kun omaisuudenhaltijoiden toimenpiteet ovat vähentäneet kuljetuskustannuksia. On kuitenkin erittäin vaikeaa arvioida, kuinka paljon kustannukset vaikuttavat kysyntään. Valituilla oletuksilla voi olla suuri vaikutus pelin kulkuun ja lopputulokseen. Tämä on merkittävä ongelma pelin suunnittelussa.

Suuntaa antava arvio saadaan Ruotsin rautatiehallinnosta vuosina 1988–2010 vastaanotetusta *Banverketiltä*, joka on käyttänyt rautateiden tavarakuljetusten kysynnän hintajouston arvoa  $\varepsilon = -0,3$  (Iikkanen 2007, s. 26) tai  $\varepsilon = -0,4$  (Banverket 2005, s. 208). Vierth ym. (2010, s. 36–37) tuovat kuitenkin esiin, että kirjallisuuden mukaan hintajousto vaihtelisi välillä  $-1,7 \leq \varepsilon \leq -0,9$ , mutta he eivät mainitse, pätevätkö arvot vain Ruotsissa vai maailmalla yleisesti. Ruotsin ja Suomen olot eivät myöskään ole täysin vertailukelpoisia keskenään, kuten Iikkanen (2007, s. 26) toteaa. Paremman arvion puuttuessa käytettäköön kuljetuskysynnän hintajoustona arvoa  $\varepsilon = -0,4$ . Itseisarvoltaan suuret hintajouston arvot voisivat liioitella hinnanmuutosten vaikutusta kuljetusmääriin, joten valittu arvo on varovaisuusperiaatteen mukainen.

Kysynnän hintajousto kuvaa hyödykkeen kysytyn määrän ja hinnan suhteellisten

muutosten suhdetta eli

$$\varepsilon = \frac{\Delta Q/Q}{\Delta P/P}, \quad (36)$$

missä

$Q$  on hyödykkeen kysytty määrä,

$P$  hyödykkeen hinta,

$\Delta Q$  hyödykkeen kysytyn määrän muutos ja

$\Delta P$  hyödykkeen hinnan muutos (Wallenius 2015b, s. 7).

Differentiaalisen hinnanmuutoksen tapauksessa hintajouaston kaava (36) voidaan kirjoittaa muodossa

$$\varepsilon = \frac{P}{Q} \cdot \frac{dQ}{dP}. \quad (37)$$

Tämän ensimmäisen kertaluvun lineaarisen differentiaaliyhtälön ratkaisu on muotoa  $Q(P) = kP^\varepsilon$ , missä  $k$  on vakio, joka voidaan ratkaista alkuarvojen avulla. Rataosan X alkutilanteessa kuljetusten yksikköhinta on  $P_{X1} = P_C = 4,44 \text{ €/t}$  (taulukko 10) ja kysytty määrä  $Q_{X1} = 1\,932\,869 \text{ t}$  (34). Kirjoitettakoon ratkaisu luettavuuden nimissä ilman yksiköitä, jolloin

$$\begin{aligned} k_X &= \frac{Q_{X1}}{P_{X1}^\varepsilon} \\ &= \frac{1\,932\,869}{4,44^{-0,4}} \\ &= 3\,510\,030 \\ &\approx 3\,510\,000. \end{aligned} \quad (38)$$

Tällöin kysytty määrä riippuu hinnasta funktion

$$Q_X(P_X) = \frac{3,510 \cdot 10^6}{P_X^{0,4}} \quad (39)$$

mukaan. Käänteinen kysyntäfunktio ( $D$ ; engl. *demand*) on

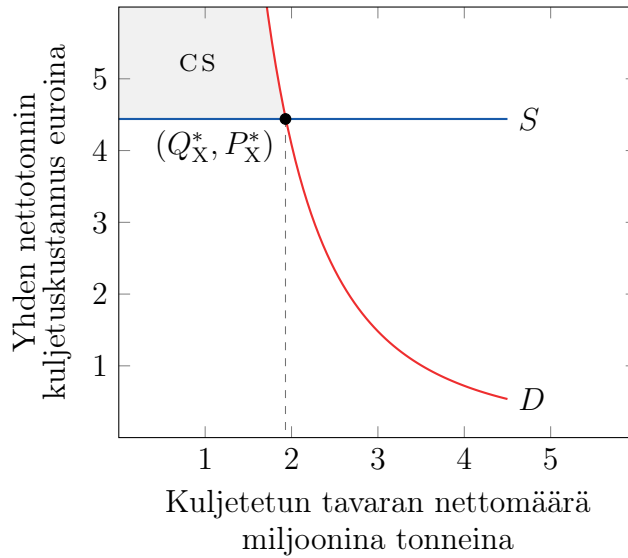
$$P_X(Q_X) = \frac{2,308 \cdot 10^{16}}{Q_X^{2,5}}. \quad (40)$$

Jos radan välityskyky ei tule vastaan, kuljetusten tarjonta voidaan olettaa täysin joustavaksi, jolloin rataosan X kuljetuksille saadaan pienten muuttuvien kustannusten takia vaakasuora tarjontakäyrä ( $S$ ; engl. *supply*). Kuljetusten tasapainomäärä ja -hintaa saadaan kysyntä- ja tarjontakäyrien leikkauspisteestä ( $Q_X^*, P_X^*$ ). Kysyntä-tarjonta-kuviosta voidaan määrittää myös kuluttajan ylijäämä ( $CS$ ; engl. *consumer surplus*), joka kertoo, kuinka paljon omaa maksuhalukkuuttaan halvemmalla kuluttaja pystyy hankkimaan jotakin hyödykettä. Matemaattisesti kuluttajan ylijäämä on kysyntäkäyrän, käyrien leikkauspisteeseen piirretyn vaakasuoran viivan sekä pys-

ty akselin rajoittaman alueen pinta-ala eli

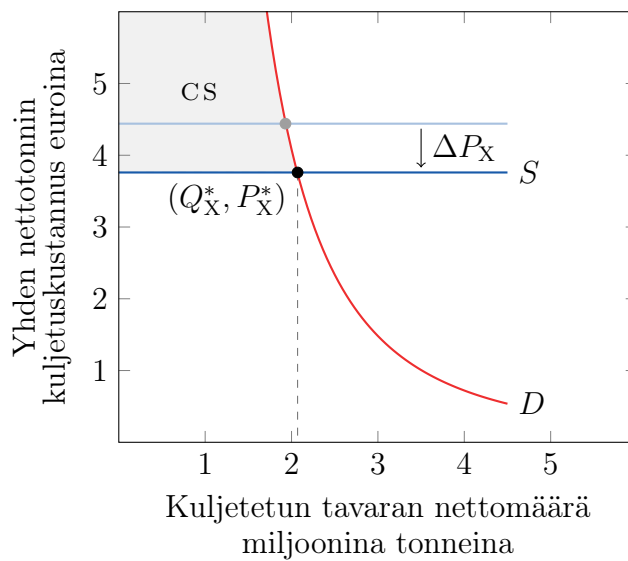
$$CS [P_X^*] = \int_0^{Q_X^*} P_X(Q_X) dQ_X - Q_X^* P_X^*. \quad (41)$$

Kysyntä- ja tarjontakäyrät, tasapainopiste sekä kuluttajan ylijäämä esitetään kuvassa 6.



Kuva 6. Rataosan X kysyntä- ja tarjontakäyrät, tasapainopiste sekä kuluttajan ylijäämä alkutilanteessa.

Jos rataosa X parannetaan rataluokkaan D4, tavarakuljetusten yksikköhinta vähenee arvoon  $P_{X2} = P_D = 3,76 \text{ €/t}$  (taulukko 10). Graafisesti tulkittuna tarjontakäyrä siirtyy alaspäin hintojen erotuksen  $\Delta P_X$  verran, mitä kuva 7 havainnollistaa.



Kuva 7. Kun rataosa X parannetaan, tarjontakäyrä siirtyy hinnanmuutoksen  $\Delta P_X$  verran, mikä siirtää tasapainopistettä ja kasvattaa kuluttajan ylijäämää.

Tarjontakäyrän siirtymisen myötä kysytty määrä on tonneina

$$\begin{aligned}
 Q_{X2} &= \frac{3,510 \cdot 10^6}{P_{X2}^{0,4}} \\
 &= \frac{3,510 \cdot 10^6}{3,76^{0,4}} \\
 &= 2\,066\,440 \\
 &\approx 2\,070\,000.
 \end{aligned} \tag{42}$$

Kuluttajan ylijäämä näyttäisi lähestyvän ääretöntä, mikä on tuskin kovin realistista tosielämässä. Tarkastelemalla pelkästään kuluttajan ylijäämän *muutosta* hinnan muuttuessa voidaan kuitenkin saada käsitys kuljetusten tarvitsijoiden vuotuisesta

hyödystä, joka on euroina

$$\begin{aligned}
u_{KX} &= CS [P_{X2}] - CS [P_{X1}] \\
&= \int_0^{Q_{X2}} P_X(Q_X) dQ_X - Q_{X2}P_{X2} - \int_0^{Q_{X1}} P_X(Q_X) dQ_X + Q_{X1}P_{X1} \\
&= \int_{Q_{X1}}^{Q_{X2}} P_X(Q_X) dQ_X + Q_{X1}P_{X1} - Q_{X2}P_{X2} \\
&= \int_{1\,932\,869}^{2\,066\,440} \frac{2,308 \cdot 10^{16}}{Q_X^{2,5}} dQ_X + 1\,932\,869 \cdot 4,44 - 2\,066\,440 \cdot 3,76 \quad (43) \\
&= \left[ \frac{2,308 \cdot 10^{16}}{1,5} Q_X^{-1,5} \right]_{1\,932\,869}^{2\,066\,440} + 8\,589\,608 - 7\,770\,392 \\
&= \frac{1,539 \cdot 10^{16}}{1\,932\,869^{1,5}} - \frac{1,539 \cdot 10^{16}}{2\,066\,440^{1,5}} + 819\,216 \\
&= 5\,726\,405 - 5\,180\,262 + 819\,216 \\
&= 1\,365\,360 \\
&\approx 1\,365\,000.
\end{aligned}$$

Vuosittain toistuvasta hyödystä saatava nykyhetken hyöty saadaan diskonttaamalla (Dodd 1918, s. 387–389). Oletetaan säästöjen vaikutusajaksi 20 vuotta. Ratahankkeiden arviointiohjeessa diskonttokoroksi määritellään  $r = 3,5\%$  (Liikennevirasto 2015b, s. 8). Kuljetusten tarvitsijoiden itsensä käyttämä diskonttokorko voi hyvin olla paljon suurempi, mutta omaisuudenhallintanäkökulmasta on syytä käyttää Liikenneviraston käyttämää korkoa. Kuljetusten tarvitsijoiden hyödyn nykyarvo (NPV; engl. *net present value*) on

$$\begin{aligned}
NPV [u_{KX}] &= \sum_{i=1}^{20} \frac{u_{KX}}{(1+r)^i} \\
&= \sum_{i=1}^{20} \frac{1\,365\,360 \text{ €}}{(1+0,035)^i} \quad (44) \\
&= 19\,405\,041 \text{ €} \\
&\approx 19\,400\,000 \text{ €}.
\end{aligned}$$

Kuljetusten tarvitsijoiden saamaa hyötyä rataosan X parantamisesta täytyy verrata hyötyyn, jonka he saisivat rataosan Y parantamisesta. Rataosan Y alkutilanteessa kuljetusten yksikköhinta on sama kuin rataosalla X mahdollisten parannustoimenpiteiden jälkeen  $P_{Y1} = P_D = 3,76 \text{ €/t}$  (taulukko 10). Kuljetetun tavaran nettomäärä on  $Q_{Y1} = 2\,134\,289 \text{ t}$  (35).

Differentiaaliyhtälön (37) ratkaisu rataosan Y alkuarvoilla on

$$\begin{aligned} k_Y &= \frac{Q_{Y1}}{P_{Y1}^\varepsilon} \\ &= \frac{2\,134\,289}{3,76^{-0,4}} \\ &= 3\,625\,278 \\ &\approx 3\,625\,000. \end{aligned} \tag{45}$$

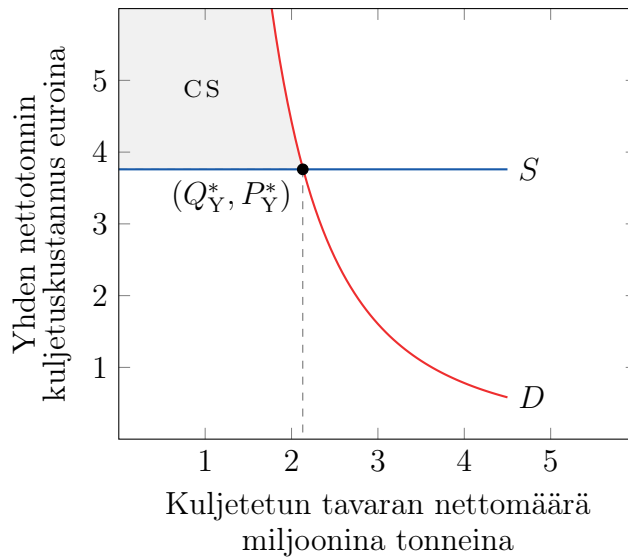
Näin rataosan Y kuljetusten kysytty määrä hinnan funktiona on

$$Q_Y(P_Y) = \frac{3,625 \cdot 10^6}{P_Y^{0,4}}. \tag{46}$$

Käänteinen kysyntäfunktio on

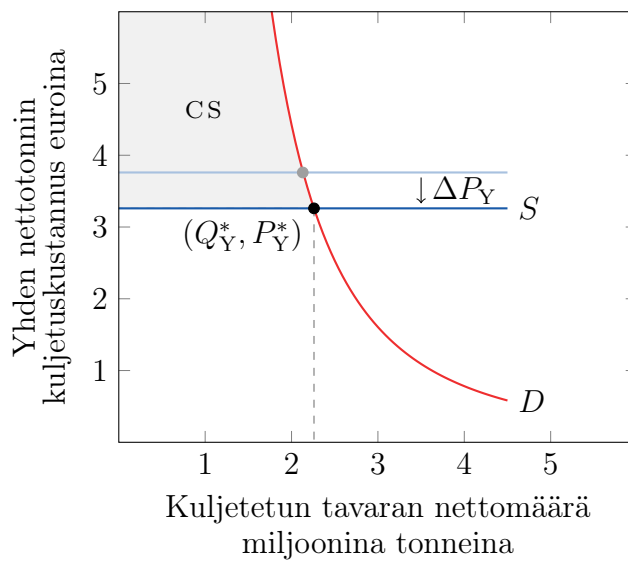
$$P_Y(Q_Y) = \frac{2,502 \cdot 10^{16}}{Q_Y^{2,5}}. \tag{47}$$

Myös rataosalla Y on vaakasuora tarjontakäyrä (kuva 8).



Kuva 8. Rataosan Y kysyntä- ja tarjontakäyrät, tasapainopiste sekä kuluttajan ylijäämä alkutilanteessa.

Jos rataosa Y parannetaan rataluokkaan E4, tavarakuljetusten yksikköhinta vähenee arvoon  $P_{Y2} = P_E = 3,26 \text{ €/t}$  (taulukko 10). Tarjontakäyrän siirtyminen alaspäin hintojen erotuksen  $\Delta P_Y$  verran esitetään kuvassa 9.



Kuva 9. Kun rataosa Y parannetaan, tarjontakäyrä siirtyy hinnanmuutoksen  $\Delta P_Y$  verran, mikä siirtää tasapainopistettä ja kasvattaa kuluttajan ylijäämää.

Uusi kysytty määrä on tonneina

$$\begin{aligned}
 Q_{Y2} &= \frac{3,625 \cdot 10^6}{P_{Y2}^{0,4}} \\
 &= \frac{3,625 \cdot 10^6}{3,26^{0,4}} \\
 &= 2\,260\,020 \\
 &\approx 2\,260\,000.
 \end{aligned} \tag{48}$$

Kuljetusten tarvitsijoiden vuotuinen hyöty eli kuluttajan ylijäämän muutos on



euroina

$$\begin{aligned}
u_{KY} &= CS[P_{Y2}] - CS[P_{Y1}] \\
&= \int_0^{Q_{Y2}} P_Y(Q_Y) dQ_Y - Q_{Y2}P_{Y2} - \int_0^{Q_{Y1}} P_Y(Q_Y) dQ_Y + Q_{Y1}P_{Y1} \\
&= \int_{Q_{Y1}}^{Q_{Y2}} P_Y(Q_Y) dQ_Y + Q_{Y1}P_{Y1} - Q_{Y2}P_{Y2} \\
&= \int_{2\,134\,289}^{2\,260\,020} \frac{2,502 \cdot 10^{16}}{Q_Y^{2,5}} dQ_Y + 2\,134\,289 \cdot 3,76 - 2\,260\,020 \cdot 3,26 \quad (49) \\
&= \left/ \frac{2\,260\,020}{2\,134\,289} - \frac{1,668 \cdot 10^{16}}{Q_Y^{1,5}} + 8\,025\,525 - 7\,365\,203 \right. \\
&= \frac{1,668 \cdot 10^{16}}{2\,134\,289^{1,5}} - \frac{1,668 \cdot 10^{16}}{2\,260\,020^{1,5}} + 660\,322 \\
&= 5\,350\,350 - 4\,910\,135 + 660\,322 \\
&= 1\,100\,537 \\
&\approx 1\,100\,000.
\end{aligned}$$

Hyötyvirrat diskontataan lausekkeessa (44) käytettyä diskonttokorkoa  $r = 3,5\%$  ja 20 vuoden tarkasteluaikaa käyttäen, jolloin kuljetusten tarvitsijoiden hyödyn nykyarvo on

$$\begin{aligned}
NPV[u_{KY}] &= \sum_{i=1}^{20} \frac{u_{KY}}{(1+r)^i} \\
&= \sum_{i=1}^{20} \frac{1\,100\,537 \text{ €}}{(1+0,035)^i} \quad (50) \\
&= 15\,641\,276 \text{ €} \\
&\approx 15\,600\,000 \text{ €}.
\end{aligned}$$

Nämä diskonttatut hyötyvirrat ovat kuljetusten tarvitsijoiden mahdollisia tulemia. Tulemat ovat kuitenkin riippuvaisia toisen pelaajan – omaisuudenhaltijoiden – valinnoista, jotka puolestaan edellyttävät riittävän suurta määrärahaa, jonka myöntää kolmas pelaaja – päättäjät.

#### 4.2.2 Omaisuudenhaltijoiden näkökulma

Jotta omaisuudenhaltijat pystyisivät hyödyntämään rautatieomaisuuden arvon, heidän täytyy tietää, kuinka paljon hyötyä omaisuudesta on mahdollista saada. Jos

mahdollisia *ulkoisvaikutuksia* ei oteta huomioon, hyöty kohdistuu kuljetusten tarvitsijoille. Jotta omaisuudenhaltijajoukkoa voidaan pitää tavoitteellisena pelaajana, heillekin täytyy kuitenkin määritellä jokin hyötyfunktio. Yksi määritelmä on, että heidän hyötynsä  $u_O$  on aina täsmälleen yhtä suuri kuin kuljetusten tarvitsijoiden hyöty  $u_K$ . Omaisuudenhaltijat ovat siis tässä mielessä *altruistisia* toimijoita.

Oletus täydellisestä altruismista on rohkea, mutta ilman sitä peliä olisi paljon vaikeampaa mallintaa. Oletus on kuitenkin ennen kaikkea mallinnusmenetelmä, eikä filosofinen kannanotto. Oletusta tukee ajatus väyläverkoston välinearvosta: omaisuudenhaltijat pyrkivät hyödyntämään omaisuuden arvoa, mikä onnistuu parhaiten väylien käyttäjien etua maksimoimalla.

Omaisuudenhaltijoiden valitsemaa strategiaa kuvaa investointivektori  $\mathbf{I}$ . Olkoot yleisesti rataluokkaan E4 kuuluvien rataosuuksien toimenpiteisiin tehtävän investoinnin suuruus  $I_E$ , rataluokkaan D4 kuuluvien osuuksien  $I_D$  ja rataluokkaan C4 kuuluvien  $I_C$ , jotka ovat vektorin  $\mathbf{I}$  komponentteja. Investoinneilla on jokin päättäjien myöntämästä määrärahasta riippuva enimmäiskustannus. Investoinneilla  $I_D$  ja  $I_C$  nostetaan ratojen suurimpia sallittuja akselipainoja, mikä auttaa kuljetusten tarvitsijoita vähentämään kustannuksiaan edellä kuvatulla tavalla. Investoinnilla  $I_E$  pystytään parantamaan suurimmat akselipainot sallivia ratoja muilla tavoin, mutta parannusten vaikutus kuljetusten tarvitsijoiden hyötyyn ei ole yhtä ilmeinen.

Tarkastellaan edelleen kuvitteellisia rataosia X ja Y, joiden suurimpia sallittuja akselipainoja omaisuudenhaltijat voivat nostaa. Akselipainon nostamisen investointikustannus riippuu monesta asiasta, ja rataosakohtaiset vaihtelut ovat suuria, mikä heikentää käytettävän mallin luotettavuutta. Ratahallintokeskuksen tarvearvioinnin (2008b, s. 18) mukaan rataosuuksien Kontiomäki–Oulu, Oulu–Kemi, Kontiomäki–Vartius ja Iisalmi–Kontiomäki akselipainojen nostamisen kustannusten vaihteluväli on 107 000–257 000 €/km. Arvioidaan, että akselipainon nostamisen kustannus rataluokkaan C4 kuuluvalla rataosalla X on  $I_X = 150\,000$  €/km ja luokkaan D4 kuuluvalla rataosalla Y vastaavasti  $I_Y = 200\,000$  €/km.

Investointikustannuksen ohella laskelmissa täytyy ottaa huomioon akselipainon vaikutus kunnossapitokustannukseen (Koskela 2011, s. 46–47). Kun suurin sallittu akselipaino on 225 kN, vuotuinen kunnossapitokustannus on  $\mu_D = 13\,000$  €/km. Jos akselipainoa nostetaan 250 kN:iin, vuotuinen kunnossapitokustannus kasvaa viidellä prosentilla arvoon  $\mu_E = 13\,650$  €/km. Koska akselipainolla 225 kN kunnossapitokustannus on 7–11 prosenttia suurempi kuin akselipainolla 200 kN, oletetaan vuotuisen kustannuksen olevan  $\mu_C = 11\,930$  €/km, kun akselipaino on 200 kN. Jotta vuosittain toistuvat kustannukset olisivat vertailukelpoisia kertaluonteisten investointikustannusten kanssa, tulevat kustannukset täytyy diskontata (Dodd 1918, s. 387–389). Ratahankkeiden arviointiohjeessa määritellään diskonttokoroksi 3,5 prosenttia ja radan päällysrakenteen pitoajaksi 30 vuotta (Liikennevirasto 2015b, s. 8 ja 23). Näin

saadaan kunnossapitokustannusten kasvun nykyarvoksi

$$\begin{aligned}\text{NPV} [\Delta\mu_X] &= \sum_{i=1}^{30} \frac{\mu_D - \mu_C}{(1+r)^i} \\ &= \sum_{i=1}^{30} \frac{13\,000 \text{ €/km} - 11\,930 \text{ €/km}}{(1+0,035)^i} \\ &\approx 20\,000 \text{ €/km},\end{aligned}\tag{51}$$

kun rata parannetaan luokasta C4 luokkaan D4, ja

$$\begin{aligned}\text{NPV} [\Delta\mu_Y] &= \sum_{i=1}^{30} \frac{\mu_E - \mu_D}{(1+r)^i} \\ &= \sum_{i=1}^{30} \frac{13\,650 \text{ €/km} - 13\,000 \text{ €/km}}{(1+0,035)^i} \\ &\approx 12\,000 \text{ €/km},\end{aligned}\tag{52}$$

kun rata parannetaan luokasta D4 luokkaan E4. Rataosan X parantamisen kokonaiskustannus on siis

$$\begin{aligned}C_X &= d(I_X + \text{NPV} [\Delta\mu_X]) \\ &= 100 \text{ km} \cdot (150\,000 \text{ €/km} + 20\,000 \text{ €/km}) \\ &\approx 17\,000\,000 \text{ €}\end{aligned}\tag{53}$$

ja rataosan Y parantamisen

$$\begin{aligned}C_Y &= d(I_Y + \text{NPV} [\Delta\mu_Y]) \\ &= 100 \text{ km} \cdot (200\,000 \text{ €/km} + 12\,000 \text{ €/km}) \\ &\approx 21\,200\,000 \text{ €}.\end{aligned}\tag{54}$$

Jos investoinnista hyötyvä taho olisi sama kuin investoinnin rahoittaja, käytetyillä lähtöarvoilla ja tehdyillä oletuksilla rataosan X parantaminen vaikuttaisi houkuttelevammalta vaihtoehdolta, koska  $u_{KX} > C_X$  ja  $u_{KY} < C_Y$ . Päätöksenteon keskeinen ongelma onkin se, että hyödyt ja kustannukset eivät kohdistu samoille osapuolille. Tärkein omaisuudenhaltijoiden päätöksentekoa rajoittava seikka on heidän käytettävissään olevan määrärahan suuruus. On siis pohdittava asiasta päättävän tahon toimintaa.

### 4.2.3 Päättäjien näkökulma

Päättäjien valitsema strategia on omaisuudenhaltijoiden käyttöön myönnettävän määrärahan suuruus  $b$ . Jotta parantaminen onnistuisi ongelmitta, päättäjien myön-

tämän määrärahan on oltava vähintään kokonaiskustannuksen suuruinen. Muussa tapauksessa joko omaisuudenhallinnan budjetti jää alijäämäiseksi, mikä täytyy hyvittää myöhemmän vaiheen budjetista, tai syntyy korjausvelkaa. Budjettialijäämät vaikeuttavat pitkäjänteistä omaisuudenhallintaa, joten omaisuudenhaltijoilla pitäisi olla kannustin pysyä budjetissa aina, kun se on mahdollista.

Voitaneen olettaa, että päättäjien keskeinen tavoite on yhteiskunnallisen hyvinvoinnin maksimointi. Yksittäisellä päättäjällä voi olla kuitenkin myös kannustin suosia jotakin tiettyä sidosryhmää, toimialaa tai aluetta omassa päätöksenteossaan. Nämä ovat päättäjien hyötyfunktion  $u_P$  parametreja.

Julkisesta rahasta kilpailee väyläomaisuudenhallinnan lisäksi lukuisa määrä rahoituskohhteita. Vaikka päättäjillä saattaa itsellään olla selvä ja tarkka käsitys siitä, miten tulevia väylähankkeita rahoitetaan, muiden toimijoiden on vaikea tuntea näitä *preferenssejä*. Voidaan siis sanoa, että omaisuudenhaltijoilla ei ole omaisuudenhallintatoimenpiteistä päättäessään täyttä informaatiota päättäjien myöntämästä määrärahasta. He voivat korkeintaan arvioida, minkälaista todennäköisyysjakamaa päättäjien käyttäytyminen noudattaa.

Vuoden 2017 alussa Liikenne- ja viestintäministeriössä suunniteltiin liikenneverkko-yhtiön perustamista. Yksi hankkeen keskeisistä tavoitteista oli nimenomaan vähentää väyläverkon rahoituksen riippuvuutta valtion taloudellisista suhdanteista ja yhteiskunnan muiden toimintojen rahoitustarpeesta (Kuukasjärvi ym. 2017, s. 14). Muutama päivä suunnitelmasta kertoneen raportin julkaisemisen jälkeen liikenne- ja viestintäministeri Anne Berner ilmoitti, ettei yhtiön perustamiselle ole liiketaloudellisia perusteita, ja selvitys keskeytettiin (Liikenne- ja viestintäministeriö 2017).

### 4.3 Laskentaesimerkki

Testataan mallin lähtötietojen ja oletusten toimivuutta esimerkkitilanteessa. Näin voidaan saada viitteitä mallin toimivuudesta käytännössä. Tarkasteltakoon Suomen rataverkon rataosia 531 Oulu–Kontiomäki ja 554 Kontiomäki–Vartius (kuva 10).



Kuva 10. Rataosien 531 Oulu–Kontiomäki ja 554 Kontiomäki–Vartius sijainti Suomen rataverkolla.

Rata Oulusta Paltamon Kontiomäelle kulkee Muhoksen, Utajärven ja Vaalan kuntien kautta ja sen pituus on 166 km (Liikennevirasto 2017, s. 80). Rata kuuluu luokkaan D4 ja on yksiraiteinen, sähköistetty, suojastettu, kauko-ohjattu sekä varustettu junankulunvalvontajärjestelmällä (JKV). Suurin radalla sallittu tavaraliikenteen nopeus on 120 km/h, kun mitoittava akselipaino on alle 200 kN, ja 100 km/h, kun akselipaino on 200–225 kN (Liikennevirasto 2016a, liitteet 6–8). Rata avattiin liikenteelle vaiheittain: ensimmäisenä valmistui rataosuus Paltamon Kiehimän ja Kontiomäen välille 16.10.1926, mitä seurasivat rataosuudet Oulusta Muhokselle 1.11.1927, Muhokselta Utajärvelle 1.12.1928 sekä Utajärveltä Vaalaan 16.10.1929. Yhteys Oulusta Kontiomäelle valmistui viimein 1.12.1930, kun radat yhdistävä osuus Vaalasta Paltamon Kiehimään avattiin liikenteelle (Liikennevirasto 2016b, s. 12).

Tunnisen (2016) mukaan Oulusta *ratakilometriltä* 752 + 778 Muhokselle ratakilometrille 789 + 210 käytetään kiskoprofilia 54 E 1, minkä jälkeen on lyhyt osuus, jolla on käytössä kiskoprofili 60 E 1. Ratakilometriä 789 + 390 ja 796 + 500 välisellä osuudella käytetään profilia 54 E 1, ja loppumatkalla Kontiomäelle (918 + 911) profilia 60 E 1.

Kun ratakilometriä pituuksien poikkeamat 1 000 metristä oletetaan pieniksi<sup>3</sup>, saadaan tyyppin 60 E 1 kiskoilla varustettujen rataosuuksien yhteispituudeksi Oulu–Kontiomäki-välillä 123 km. Tyyppin 54 E 1 kiskoja rataosalla käytetään vastaavasti noin 43 kilometrin matkalla.

Rata Paltamon Kontiomäeltä Kuhmossa sijaitsevalle Vartiuksen raja-asemalle kulkee Ristijärven kunnan kautta ja sen pituus on 97 km (Liikennevirasto 2017, s. 80–81). Rata kuuluu luokkaan D4 ja on yksiraiteinen, sähköistetty, radio-ohjattu sekä varustettu junankulunvalvontajärjestelmällä (JKV). Suurin radalla sallittu tavaraliikenteen nopeus on 80 km/h (Liikennevirasto 2016a, liitteet 6–8). Rata avattiin liikenteelle 1.11.1976 (Liikennevirasto 2016b, s. 13).

Koko rataosalla Kontiomäeltä ratakilometriltä 658 + 786 Vartiukseen ratakilometrille 755 + 856 kiskoprofilina on 54 E 1 (Tunninen 2016).

Rataosat yhdistävä Kontiomäen ratapihan ohittamisen mahdollistava kolmioraide avattiin liikenteelle 23.5.1995. Ennen kolmioraidteen käyttöönottoa liikennöinti rataosien 531 ja 554 välillä edellytti aina junan kääntöä Kontiomäellä. Oulun ja Vartiuksen välisen matkan voidaan olettaa olevan 263 km, kun kolmioraidteen mahdollistamaa oikaisua ei oteta huomioon.

Liikenneviraston mukaan tavarajunia liikennöidään yleensä öisin, jolloin matka-aika rataosalla 531 Oulu–Kontiomäki on 3 h 5 min ja rataosalla 554 Kontiomäki–Vartius 1 h 50 min (sähköpostiviesti 8.8.2017). Kun tavaraliikenteessä käytetään kahdesta

---

<sup>3</sup> Todellisuudessa yksittäisten ratakilometriä pituudet voivat vaihdella paljonkin, mutta suurin osa ratakilometreistä on likimain 1 000 metrin mittaisia (Taimela 2011, s. 11).

sähköveturista ja 24 tavaravaunusta koostuvaa junaa, kustannusfunktioista (31) saadaan rataosakohtaisiksi yhden junan liikennöintikustannuksiksi Oulu–Kontiomäki-rataosalla

$$\begin{aligned}
 c_{531} &= \left(3 + \frac{5}{60}\right) h \cdot (112,17 \text{ €/h} + 2 \cdot 121,11 \text{ €/h} + 24 \cdot 2,04 \text{ €/h}) + \\
 &\quad 166 \text{ km} \cdot (2 \cdot 1,53 \text{ €/km} + 24 \cdot 0,49 \text{ €/km}) \\
 &\approx 3\,689 \text{ €}
 \end{aligned} \tag{55}$$

ja Kontiomäki–Vartius-rataosalla

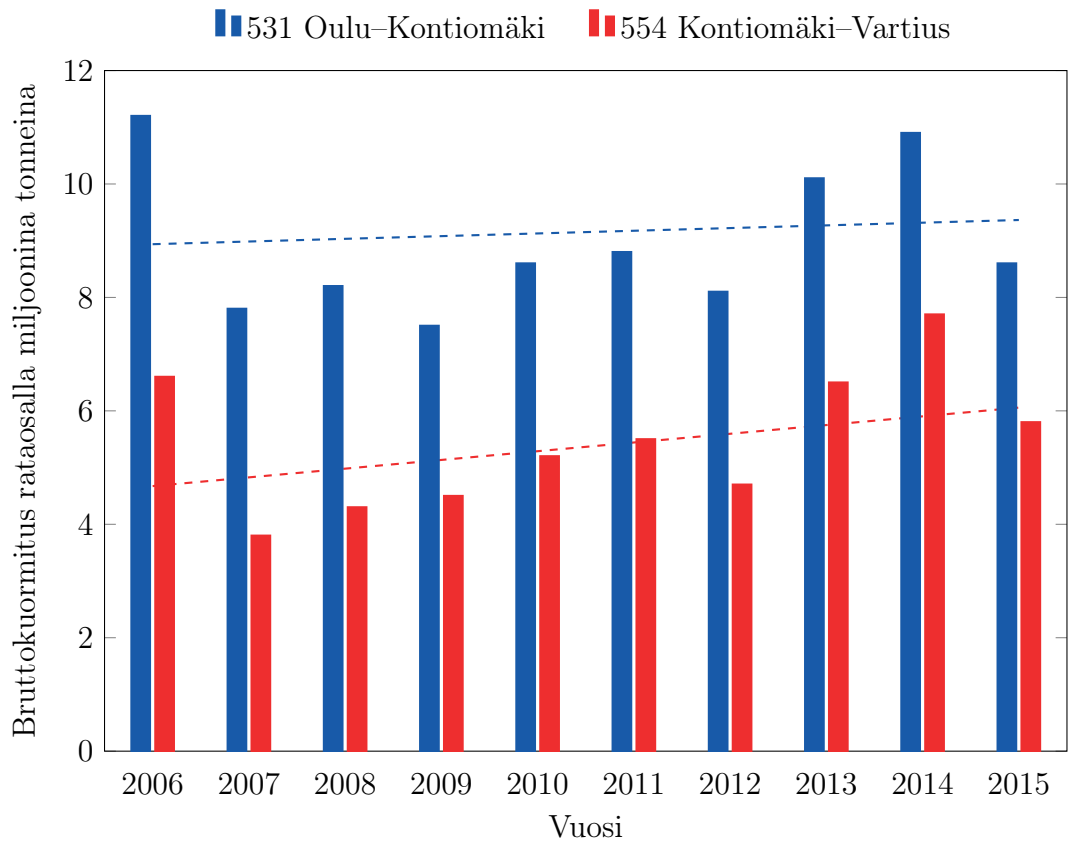
$$\begin{aligned}
 c_{554} &= \left(1 + \frac{50}{60}\right) h \cdot (112,17 \text{ €/h} + 2 \cdot 121,11 \text{ €/h} + 24 \cdot 2,04 \text{ €/h}) + \\
 &\quad 97 \text{ km} \cdot (2 \cdot 1,53 \text{ €/km} + 24 \cdot 0,49 \text{ €/km}) \\
 &\approx 2\,168 \text{ €}.
 \end{aligned} \tag{56}$$

Olettamalla luvun 4.2 tapaan, että vaunuista 47 prosenttia kulkee tyhjinä ja että loput vaunut kuormataan 69 prosenttiin kuormituskapasiteetista, voidaan junille määritellä samat keskimääräiset rataluokkakohtaiset kokonaismassat ja nettokuormat kuin kuvitteellisten rataosien taulukossa 10. Kuljetusten yksikköhinta riippuu kuitenkin myös kuljetusmatkan pituudesta sekä kuljetukseen kuluva ajasta, joten hinnat täytyy laskea erikseen rataosakohtaisesti. Taulukossa 11 esitetään yksikköhinnat nykytilanteessa, jolloin molempien rataosien rataluokka on D4, sekä tilanteissa, että rataluokkaa on joko alennettu C4:ään tai ylennetty E4:ään.

Taulukko 11. Tavarakuljetusten rataosa- ja rataluokkakohtaiset yksikkökustannukset euroina tonnilta.

	<u>C4</u>	<u>D4</u>	<u>E4</u>
<b>531 Oulu–Kontiomäki</b>	7,64	6,47	5,60
<b>554 Kontiomäki–Vartius</b>	4,49	3,80	3,29

Oulu–Kontiomäki-rataosan bruttokuormituksen vuotuinen keskiarvo vuosina 2006–2015 oli 8,98 miljoonaa tonnia ja Kontiomäki–Vartius-rataosan 5,46 miljoonaa tonnia (kuva 11).



Kuva 11. Rataosien Oulu–Kontiomäki ja Kontiomäki–Vartius bruttokuormitukset vuosina 2006–2015 (Liikennevirasto 2016b, s. 29; 2015a, s. 29; 2014, s. 29; 2013, s. 29; 2012, s. 31; 2011, s. 31; 2010, s. 31 ja Ratahallintokeskus 2009, s. 29; 2008a, s. 29; 2007, s. 29).

Kuljetettavan tavarannettomäärän vuotuinen keskiarvo on Oulu–Kontiomäki-rataosalla

$$\begin{aligned}
 Q_{531\text{ D}} &= \frac{N_{\text{D}}}{M_{\text{D}}} Q_{531\text{ b}} \\
 &= \frac{570\text{ t}}{1\,336\text{ t}} \cdot 8\,980\,000\text{ t} \\
 &= 3\,833\,183\text{ t} \\
 &\approx 3\,830\,000\text{ t}
 \end{aligned} \tag{57}$$

ja Kontiomäki–Vartius-rataosalla

$$\begin{aligned}
 Q_{554\text{ D}} &= \frac{N_{\text{D}}}{M_{\text{D}}} Q_{554\text{ b}} \\
 &= \frac{570\text{ t}}{1\,336\text{ t}} \cdot 5\,460\,000\text{ t} \\
 &= 2\,330\,643\text{ t} \\
 &\approx 2\,330\,000\text{ t}.
 \end{aligned} \tag{58}$$



Kysynnän hintajoustoa kuvaavan differentiaaliyhtälön (37) ratkaisu Oulu–Kontiomäki-rataosan alkuarvoilla  $P_{531\text{ D}} = 6,47 \text{ €/t}$  ja  $Q_{531\text{ D}} = 3\,833\,183 \text{ t}$  on

$$\begin{aligned} k_{531} &= \frac{Q_{531\text{ D}}}{P_{531\text{ D}}^\varepsilon} \\ &= \frac{3\,833\,183}{6,47^{-0,4}} \\ &= 8\,087\,436 \\ &\approx 8\,087\,000. \end{aligned} \tag{59}$$

Oulu–Kontiomäki-rataosan kuljetusten kysytty määrä hinnan funktiona on

$$Q_{531}(P_{531}) = \frac{8,087 \cdot 10^6}{P_{531}^{0,4}}. \tag{60}$$

Käänteinen kysyntäfunktio on

$$P_{531}(Q_{531}) = \frac{1,860 \cdot 10^{17}}{Q_{531}^{2,5}}. \tag{61}$$

Jos Oulu–Kontiomäki-rataosa parannetaan rataluokkaan E4, kuljetusten vaakasuora tarjontakäyrä siirtyy alaspäin kohtaan  $P_{531\text{ E}} = 5,60 \text{ €/t}$ , jolloin kuljetusten kysytyksi määräksi tonneina tulee

$$\begin{aligned} Q_{531\text{ E}} &= \frac{8,087 \cdot 10^6}{P_{531\text{ E}}^{0,4}} \\ &= \frac{8,087 \cdot 10^6}{5,60^{0,4}} \\ &= 4\,058\,997 \\ &\approx 4\,060\,000 \end{aligned} \tag{62}$$

Rataosan Oulu–Kontiomäki parantamisen aiheuttama hyöty kuljetusten tarvitsijoille,

eli kuluttajan ylijäämän (41) muutos euroina, on

$$\begin{aligned}
u_{K531} &= CS[P_{531E}] - CS[P_{531D}] \\
&= \int_0^{Q_{531E}} P_{531}(Q_{531}) dQ_{531} - Q_{531E}P_{531E} - \\
&\quad \int_0^{Q_{531D}} P_{531}(Q_{531}) dQ_{531} + Q_{531D}P_{531D} \\
&= \int_{Q_{531D}}^{Q_{531E}} P_{531}(Q_{531}) dQ_{531} + Q_{531D}P_{531E} - Q_{531E}P_{531E} \\
&= \int_{3833183}^{4058997} \frac{1,860 \cdot 10^{17}}{Q_{531}^{2,5}} dQ_{531} + 3833183 \cdot 6,47 - 4058997 \cdot 5,60 \\
&= \left/ \frac{4058997}{3833183} - \frac{1,240 \cdot 10^{17}}{Q_{531}^{1,5}} + 24784940 - 22745690 \right. \\
&= \frac{1,240 \cdot 10^{17}}{3833183^{1,5}} - \frac{1,240 \cdot 10^{17}}{4058997^{1,5}} + 2039249 \\
&= 16523293 - 15163793 + 2039249 \\
&= 3398749 \\
&\approx 3399000.
\end{aligned} \tag{63}$$

Diskonttaamalla hyötyvirrat diskonttokorkoa  $r = 3,5\%$  ja 20 vuoden tarkasteluaikaa käyttäen saadaan hyödyn nykyarvoksi

$$\begin{aligned}
NPV[u_{K531}] &= \sum_{i=1}^{20} \frac{u_{K531}}{(1+r)^i} \\
&= \sum_{i=1}^{20} \frac{3398749 \text{ €}}{(1+0,035)^i} \\
&= 48304390 \text{ €} \\
&\approx 48300000 \text{ €}.
\end{aligned} \tag{64}$$

Tehdään vastaavat laskelmat myös Kontiomäki–Vartius-rataosalle. Differentiaaliyh-tälön (37) ratkaisu Kontiomäki–Vartius-rataosan alkuarvoilla  $P_{554D} = 3,80 \text{ €/t}$  ja

$Q_{554\text{D}} = 2\,330\,643\text{ t}$  on

$$\begin{aligned}
 k_{554} &= \frac{Q_{554\text{D}}}{P_{554\text{D}}^\varepsilon} \\
 &= \frac{2\,330\,643}{3,80^{-0,4}} \\
 &= 3\,975\,735 \\
 &\approx 3\,976\,000.
 \end{aligned} \tag{65}$$

Oulu–Kontiomäki-rataosan kuljetusten kysytty määrä hinnan funktiona on

$$Q_{554}(P_{554}) = \frac{3,976 \cdot 10^6}{P_{554}^{0,4}}. \tag{66}$$

Käänteinen kysyntäfunktio on

$$P_{554}(Q_{554}) = \frac{3,152 \cdot 10^{16}}{Q_{554}^{2,5}}. \tag{67}$$

Jos Kontiomäki–Vartius-rataosa parannetaan rataluokkaan E4, kuljetusten vaakasuora tarjontakäyrä siirtyy alaspäin kohtaan  $P_{554\text{E}} = 3,29\text{ €/t}$ , jolloin kuljetusten kysytyksi määräksi tonneina tulee

$$\begin{aligned}
 Q_{554\text{E}} &= \frac{3,976 \cdot 10^6}{P_{554\text{E}}^{0,4}} \\
 &= \frac{3,976 \cdot 10^6}{3,29^{0,4}} \\
 &= 2\,467\,942 \\
 &\approx 2\,468\,000
 \end{aligned} \tag{68}$$

Rataosan Kontiomäki–Vartius parantamisen aiheuttama hyöty kuljetusten tarvitsi-

joille, eli kuluttajan ylijäämän (41) muutos euroina, on

$$\begin{aligned}
u_{K554} &= CS[P_{554E}] - CS[P_{554D}] \\
&= \int_0^{Q_{554E}} P_{554}(Q_{554}) dQ_{554} - Q_{554E}P_{554E} - \\
&\quad \int_0^{Q_{554D}} P_{554}(Q_{554}) dQ_{554} + Q_{554D}P_{554D} \\
&= \int_{Q_{554D}}^{Q_{554E}} P_{554}(Q_{554}) dQ_{554} + Q_{554D}P_{554E} - Q_{554E}P_{554E} \\
&= \int_{2330643}^{2467942} \frac{3,152 \cdot 10^{16}}{Q_{554}^{2,5}} dQ_{554} + 2330643 \cdot 3,80 - 2467942 \cdot 3,29 \\
&= \left/_{2330643}^{2467942} - \frac{2,101 \cdot 10^{16}}{Q_{554}^{1,5}} + 8857879 - 8129073 \right. \\
&= \frac{2,101 \cdot 10^{16}}{2330643^{1,5}} - \frac{2,101 \cdot 10^{16}}{2467942^{1,5}} + 728806 \\
&= 5905253 - 5419382 + 728806 \\
&= 1214677 \\
&\approx 1215000.
\end{aligned} \tag{69}$$

Diskonttaamalla hyötyvirrat diskonttokorkoa  $r = 3,5\%$  ja 20 vuoden tarkasteluaikaa käyttäen saadaan hyödyn nykyarvoksi

$$\begin{aligned}
NPV[u_{K554}] &= \sum_{i=1}^{20} \frac{u_{K554}}{(1+r)^i} \\
&= \sum_{i=1}^{20} \frac{1214677 \text{ €}}{(1+0,035)^i} \\
&= 17263486 \text{ €} \\
&\approx 17300000 \text{ €}.
\end{aligned} \tag{70}$$

Luvussa 4.2 todettiin rataluokan ylentämisen D4:stä E4:ään investointikustannukseksi  $I = 200000 \text{ €/km}$  ja kunnossapitokustannusten kasvun nykyarvoksi  $NPV[\Delta\mu] \approx 12000 \text{ €/km}$ . Oulu–Kontiomäki-rataosan parantamisen kokonaiskustannus on siis

$$\begin{aligned}
C_{531} &= d_{531}(I + NPV[\Delta\mu]) \\
&= 166 \text{ km} \cdot (200000 \text{ €/km} + 12000 \text{ €/km}) \\
&\approx 35200000 \text{ €}
\end{aligned} \tag{71}$$

ja Kontiomäki–Vartius-rataosan parantamisen

$$\begin{aligned}C_{554} &= d_{554}(I + \text{NPV}[\Delta\mu]) \\&= 97 \text{ km} \cdot (200\,000 \text{ €/km} + 12\,000 \text{ €/km}) \\&\approx 20\,600\,000 \text{ €}\end{aligned}\tag{72}$$

Laskelmien perusteella Oulu–Kontiomäki-rataosan parantaminen vaikuttaa kannattavalta, mutta Kontiomäki–Vartius-rataosan ei. Oma kysymyksensä on se, kannattaako parantaa vain yksittäistä rataosaa, jolloin mahdollisia verkostohyötyjä ei saada täysimääräisinä. Jos merkittävä osa Oulun ja Kontiomäen välisistä kuljetuksista käyttää myös Kontiomäki–Vartius-rataosaa, molempien rataosien parantaminen voi olla perusteltua.

Oulu–Kontiomäki- ja Kontiomäki–Vartius-rataosien suurimman sallitun akselipainon nostaminen 250 kN:iin on Ratahallintokeskuksen tarvearvioinnissa (2008b, s. 18) suunniteltu ajoitettavaksi vuosille 2018–2022. Investointikustannus Oulu–Kontiomäki-välillä oli silloisen arvion mukaan 32,9 miljoonaa euroa ja Kontiomäki–Vartius-välillä 12,3 miljoonaa euroa. Vuoden 2008 syyskuussa maarakennuskustannusindeksi oli 123,89 vuoden 2005 indeksin ollessa 100 (Suomen virallinen tilasto 2017b). Vuoden 2017 kesäkuun indeksiin 134,5 muunnettuina arvioidut investointikustannukset ovat 35,7 miljoonaa euroa ja 13,4 miljoonaa euroa. Kunnossapitokustannusten kasvu ei tiettävästi ole mukana luvuissa, mutta arviot ovat ainakin samassa suuruusluokassa tämän työn laskelmien tulosten kanssa.

Voidaan myös pohtia, mitä tapahtuisi, jos rataosien suurimpia sallittuja akselipainoja jouduttaisiin laskemaan 200 kN:iin. Kuljetusten yksikkökustannukset kasvaisivat, jolloin kuljetuksia järjestettäisiin vähemmän, mikä vähentäisi kuluttajan ylijäämää. Kielteiset vaikutukset voidaan arvioida suuruusluokaltaan samankaltaisiksi kuin akselipainojen nostamisen myönteiset vaikutukset. On siis varmasti kuljetusten tarvitsijoiden edun mukaista, että radat pidetään vähintään nykyisenkaltaisessa kunnossa.

## 4.4 Pelin kulku

Edustakoon omaisuudenhaltijoiden, kuljetusten tarvitsijoiden ja päättäjien välinen peli yhtä eduskunnan nelivuotiskautta. Päättäjät myöntävät määrärahan omaisuudenhaltijoiden käyttöön aina vuodeksi kerrallaan ensimmäistä vuotta lukuun ottamatta, jolloin käytettävissä oleva määräraha perustuu edellisen toimikauden viimeisen vuoden päätöksiin. Kuljetusten tarvitsijat valitsevat kuljetusmääränsä niin ikään kerran vuodessa, mutta toimikauden neljännen vuoden valinta ei enää vaikuta muiden pelaajien toimiin, joten se sivuutetaan tarkastelussa. Omaisuudenhaltijat tuntevat aina kyseisen vuoden rahoitustilanteen ja pystyvät ennakoimaan seuraavan vuoden määrärahan riittävän tarkasti, jotta he voivat valita strategiansa kahdeksi vuodeksi

kerrallaan. Toimikauden pelivuorot ovat järjestyksessä:

1. Omaisuudenhaltijat valitsevat ensimmäisen ja toisen vuoden kunnossapitostrategian.
2. Kuljetusten tarvitsijat valitsevat ensimmäisen vuoden kuljetusmäärän.
3. Päättäjät valitsevat toisen vuoden määrärahan suuruuden.
4. Kuljetusten tarvitsijat valitsevat toisen vuoden kuljetusmäärän.
5. Päättäjät valitsevat kolmannen vuoden määrärahan suuruuden.
6. Omaisuudenhaltijat valitsevat kolmannen ja neljännen vuoden kunnossapitostrategian.
7. Kuljetusten tarvitsijat valitsevat kolmannen vuoden kuljetusmäärän.
8. Päättäjät valitsevat neljännen vuoden määrärahan suuruuden.

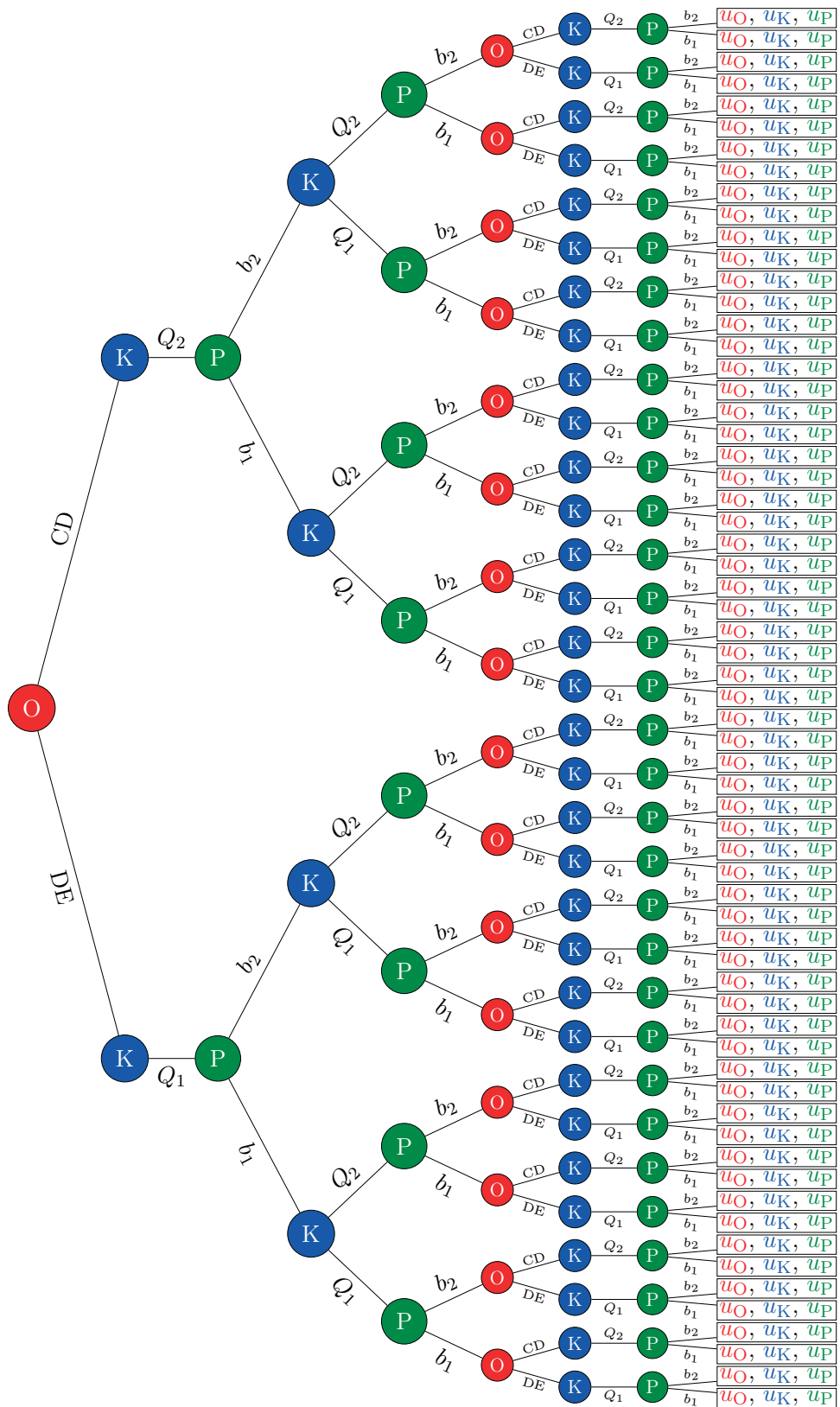
Pelaajilla voidaan ajatella olevan lukematon määrä strategiavaihtoehtoja. Yksinkertaistetaan peliä olettamalla, että kuljetusten tarvitsijat valitsevat kahden vaihtoehdon liikennemäärän  $Q_1$  ja  $Q_2$  välillä, päättäjät määrärahan suuruuksien  $b_1$  ja  $b_2$  välillä, sekä omaisuudenhaltijat kunnossapitostrategioiden DE ja CD välillä. Strategia DE tarkoittaa rataluokan D4 rataosien parantamista luokkaan E4 ja strategia CD vastaavasti luokan C4 ratojen parantamista luokkaan D4. Näistä diskreeteistä valintamahdollisuuksista koostuvan pelin ekstensiivinen muoto esitetään kuvassa 12. Pelissä on 256 tulemavaihtoehtoa, joten sen ratkaiseminen on erittäin työlästä. On siis syytä rajata vaihtoehtojen määrää tekemällä joitakin yksinkertaistavia oletuksia.



OmaisuuDENhaltijat oletettiin altruistisiksi toimijoiksi, mikä tarkoittaa käytännössä, että heillä on oltava täysi informaatio kuljetusten tarvitsijoiden preferensseistä. Koska rautatieliikennöitsijöitä ja heidän asiakkaitaan on vähän, oletus on kohtalaisen realistinen. Esimerkiksi tieliikenteessä näin ei olisi, koska miljoonien tieverkolla liikkuvien ihmisten preferenssien tunteminen olisi mahdotonta.

OmaisuuDENhaltijoiden täysi informaatio kuljetusten tarvitsijoiden preferensseistä voidaan tulkita pelipuussa siten, että aina, kun kuljetusten tarvitsijoiden valintavuoro on välittömästi omaisuuDENhaltijoiden jälkeen, heillä on käytännössä vain yksi strategiavaihtoehto. Näin pelin tulemayhdistelmien määrä saadaan rajattua 64:ään (kuva 13).





Kuva 13. Yksinkertaistettu omaisuudenhallintapeli ekstensiivisessä muodossa. Pelin tulemayhdistelmien määrä on enää  $2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 = 64$ .

Tilanne muistuttaa Stackelbergin kilpailupeliä, jossa toinen pelaaja valitsee strategiansa, kun hän on ensin havainnut ensimmäisen pelaajan valinnan (Fisk 1984, s. 304). Tällöin ensimmäisellä pelaajalla on selvä kilpailuetu. Ero Stackelbergin peliin on kuitenkin se, että kuljetusten tarvitsijat ja omaisuudenhaltijat eivät kilpaile keskenään. Omaisuudenhaltijat pyrkivät pikemminkin edistämään kuljetusten tarvitsijoiden ja yhteiskunnan etua optimoimalla liikenneverkon toiminnallisuutta.

Päteköön kuljetusten tarvitsijoiden valitsemille liikennemäärille

$$Q_1 > Q_2 \tag{73}$$

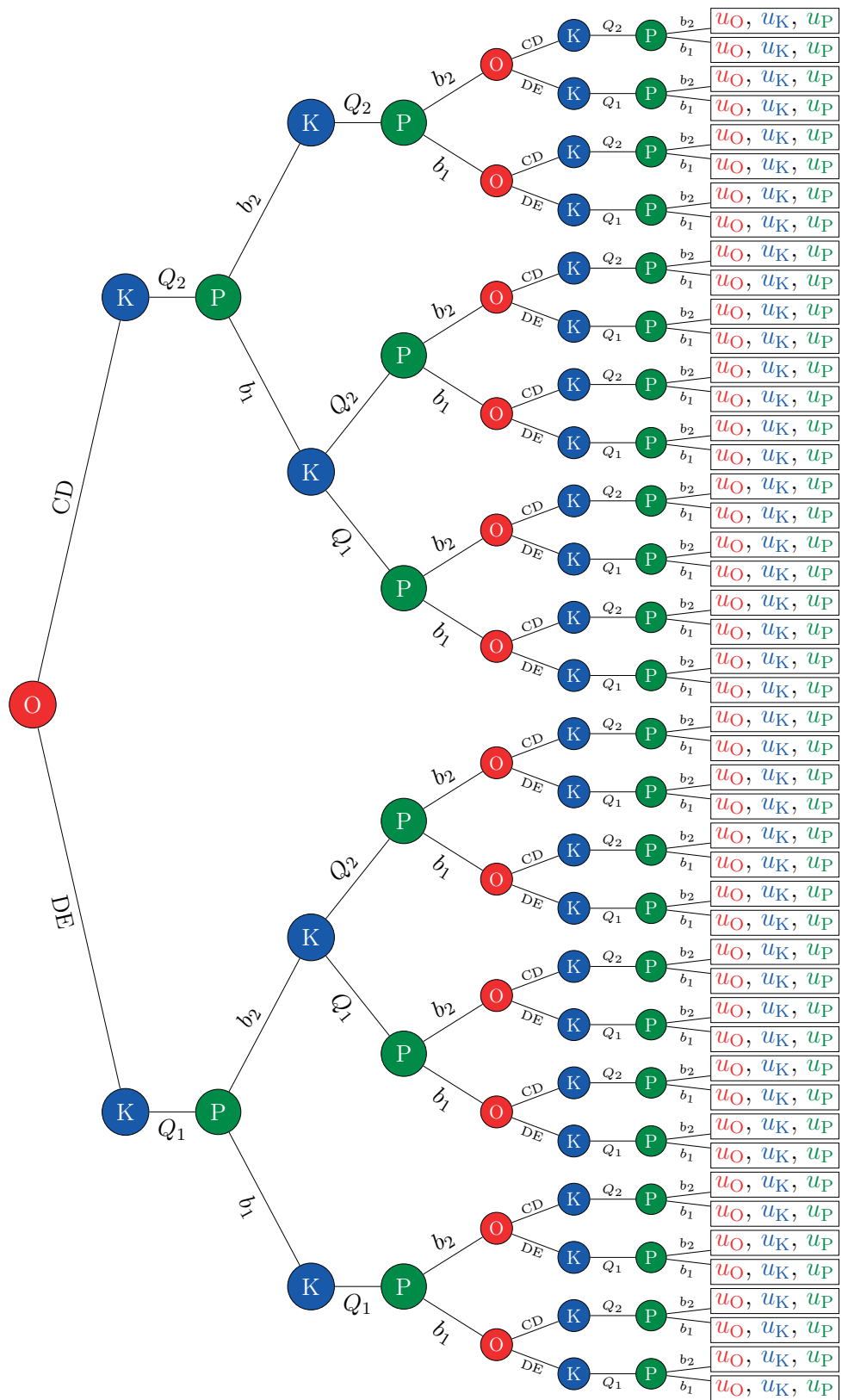
ja päättäjien valitsemille määrärahan suuruuksille

$$b_1 > b_2. \tag{74}$$

Oletetaan tällöin, että

- jos kuljetusten tarvitsijat valitsevat toisessa vaiheessa liikennemäärän  $Q_1$  ja päättäjät valitsevat kolmannessa vaiheessa määrärahan suuruuden  $b_1$ , kuljetusten tarvitsijat valitsevat myös neljännessä vaiheessa liikennemäärän  $Q_1$
- jos kuljetusten tarvitsijat valitsevat toisessa vaiheessa liikennemäärän  $Q_2$  ja päättäjät valitsevat kolmannessa vaiheessa määrärahan suuruuden  $b_2$ , kuljetusten tarvitsijat valitsevat myös neljännessä vaiheessa liikennemäärän  $Q_2$ .

Oletusten ansiosta pelissä on nyt enää 48 tulemayhdistelmää (kuva 14).



Kuva 14. Yksinkertaistettu omaisuudenhallintapeli ekstensiivisessä muodossa. Pelin tulemayhdistelmien määrää on vähennetty 64:stä edelleen 48:aan.

Vaikka suurin osa pelin vaihtoehtoisista kehityskuluista rajattiin pois, peliä ei pystytä näillä tiedoilla ratkaisemaan, koska päättäjien käyttäytymisen kuvaaminen on lähes mahdotonta. Varsinkaan kuljetusten tarvitsijoiden näkökulmasta määrärahan myöntämisen perusteet eivät välttämättä ole läpinäkyviä, koska päätökseen vaikuttaa moni ulkoinen seikka, kuten päättäjien henkilökohtaiset arvot, heidän oletuksensa rahoituksen vaikutuksista sekä muiden julkisesta rahoituksesta kilpailevien kohteiden rahoitustarpeet. Omaisuudenhaltijoilla voi olla hieman parempi käsitys päättäjien toiminnasta, koska heidän vuorovaikutuksensa päättäjien kanssa lienee suurempaa. Pohditaan vielä, miten kuljetusten tarvitsijat voisivat saada lisäinformaatiota ja kasvattaa omaa vaikutustaan pelin tulemaan.

## 4.5 Rataverkon kunnon arviointi

Kuljetusten tarvitsijoilla tuskin on yhtä tarkkaa, yksityiskohtaista tai ajankohtaista tietoa rataverkon tilasta kuin omaisuudenhaltijoilla. He voivat kuitenkin tehdä valistuneita arvauksia ja laskelmia, sekä yrittää mallintaa tilannetta, jos heillä on sopivia lähtötietoja. Tieto on heille arvokasta, koska verkon kunnon yllättävät heikkenemät voisivat haitata liiketoimintaa joko kustannuksia kasvattamalla tai tuottoa vähentämällä, kuten luvun 4.3 lopussa todettiin.

Mallinnetaan rataosien kunnon muutoksia Markovin ketjuna, jonka aika-askel on yksi vuosi. Markovin ketjulla tarkoitetaan tässä diplomityössä muistitonta stokastista prosessia, jonka aika-askleet ovat diskreettejä. Muistittomuus tarkoittaa sitä, että prosessin tila hetkellä  $t + 1$  riippuu ainoastaan prosessin tilasta hetkellä  $t$ .

Prosessin tila hetkellä  $t$  voidaan esittää stokastisena vektorina

$$\mathbf{x}^{(t)} = \begin{bmatrix} x_1^{(t)} & x_2^{(t)} & \dots & x_i^{(t)} & \dots & x_n^{(t)} \end{bmatrix}, \quad (75)$$

missä alkio  $x_i$  on todennäköisyys, jolla prosessin tila on  $i$ . Vektorin alkioiden summan on oltava 1 eli

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1. \quad (76)$$

Prosessin tilasta hetkellä  $t$  voidaan johtaa hetken  $t + k$  tila

$$\mathbf{x}^{(t+k)} = \mathbf{x}^{(t)} \mathbf{P}^k \quad \forall k \in \mathbb{N}, \quad (77)$$

missä  $\mathbf{P}$  on todennäköisyysmatriisi

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1j} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2j} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{i1} & p_{i2} & \cdots & p_{ij} & \cdots & p_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nj} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}. \quad (78)$$

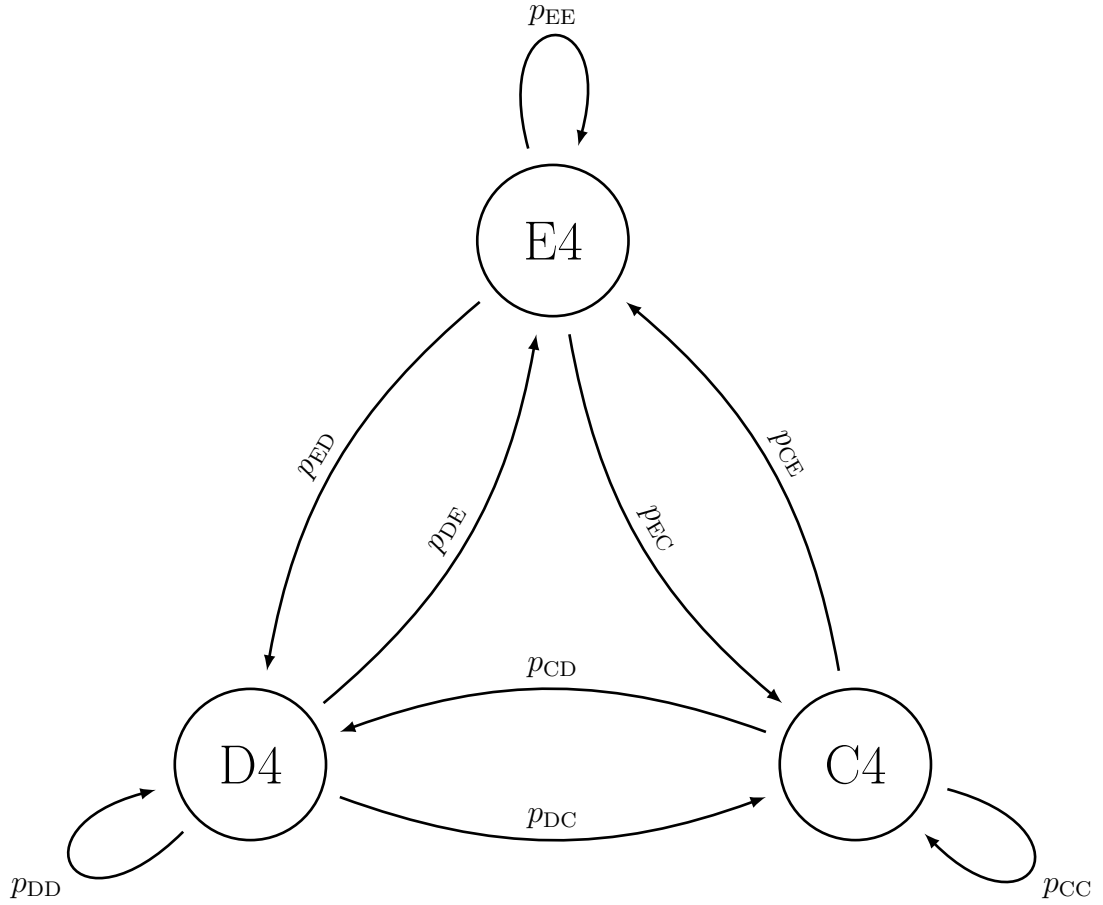
Matriisin  $\mathbf{P}$  alkio  $p_{ij}$  on todennäköisyys, jolla prosessin tila-alkio  $i$  muuttuu tila-alkioksi  $j$ . Kun  $i = j$ , kyseinen tila-alkio ei muutu. Matriisin kunkin rivin  $i$  alkioden summan on oltava 1 eli

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1. \quad (79)$$

Rataverkon kunnan Markovin prosessissa stokastisen vektorin  $\mathbf{x}^{(t)}$  mahdollisia tiloja ovat rataluokat E4, D4 ja C4. Taulukossa 9 esitettyjä rataluokkakohtaisia osuuksia kuvaava stokastinen vektori hetkellä  $t = 0$  on

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{(0)} &= \begin{bmatrix} x_E^{(0)} & x_D^{(0)} & x_C^{(0)} \end{bmatrix} \\ &= [0,070 \quad 0,794 \quad 0,137]. \end{aligned} \quad (80)$$

Markovin ketju rataluokkien muutoksista esitetään kuvassa 15.



Kuva 15. Rataluokan stokastista muutosta kuvaava Markovin ketju, jossa mikä tahansa muutos rataluokkien E4, D4 ja C4 välillä on mahdollinen. Yhden aika-askelen kuluessa esimerkiksi rataluokasta E4 muutos luokkaan D4 tapahtuu todennäköisyydellä  $p_{ED}$  ja luokkaan C4 todennäköisyydellä  $p_{EC}$ . Todennäköisyydellä  $p_{EE}$  rataluokka ei muutu.

On ilmeistä, että rataluokkaa ei voida ylentää ilman omaisuudenhaltijan toimenpiteitä, joten

$$p_{CD} = p_{CE} = p_{DE} = 0. \quad (81)$$

Markovin ketjun kustakin solmusta lähtevien kaarten todennäköisyyksien summan on oltava 1, joten

$$\begin{aligned} p_{CC} &= 1 - p_{CD} - p_{CE} \\ &= 1. \end{aligned} \quad (82)$$

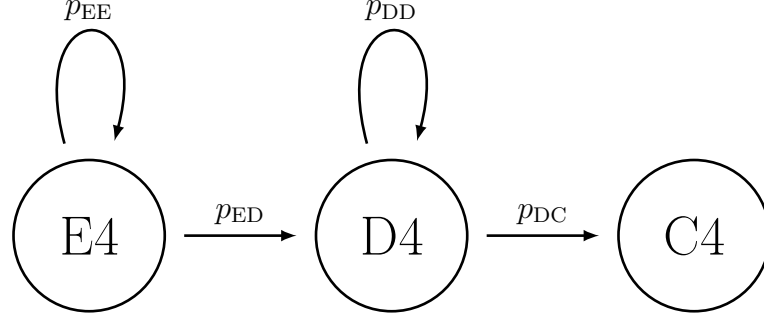
Lisäksi oletetaan rataluokkaa alennettavan kerrallaan vain yhdellä, jolloin myös

$$p_{EC} = 0. \quad (83)$$

Jos rataluokkaa jouduttaisiin kuitenkin alentamaan kahdella hyvin lyhyen ajan kuluessa, tarpeeksi tiheitä aika-askelia käytettäessä oletus (83) pätsisi edelleen (Wu

ym. 2016, s. 49).

Oletusten (81), (82) ja (83) seurauksena Markovin ketju yksinkertaistuu kuvan 16 mukaiseksi.



Kuva 16. Rataluokan stokastista muutosta kuvaava Markovin ketju, jossa ainoat mahdolliset rataluokanmuutokset ovat alenemat luokasta E4 luokkaan D4 ja luokasta D4 luokkaan C4.

Kuvan 15 Markovin ketjun sieveneminen kuvan 16 muotoon vastaa todennäköisyysmatriisia

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P} &= \begin{bmatrix} p_{EE} & p_{ED} & p_{EC} \\ p_{DE} & p_{DD} & p_{DC} \\ p_{CE} & p_{CD} & p_{CC} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} p_{EE} & p_{ED} & 0 \\ 0 & p_{DD} & p_{DC} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{84}$$

Kuljetusten tarvitsijoiden täytyy tyytyä arvioimaan todennäköisyyksiä  $p_{EE}$ ,  $p_{ED}$ ,  $p_{DD}$  ja  $p_{DC}$ . Yksi tapa tämän arvioimiseen on pohtia, kuinka kauan keskimäärin kestää, että rataluokan E4 rataosa alennetaan luokkaan D4 tai rataluokan D4 rataosa luokkaan C4. Kuljetusten tarvitsijat voivat esimerkiksi olettaa, että rataluokkaa alennetaan E4:stä D4:ään kymmenen ja D4:stä C4:ään viidentoista vuoden kuluessa 50 prosentin luottamustasolla. Tämän tiedon perusteella saadaan rataluokan muuttumattomana säilymisen todennäköisyydeksi rataluokassa E4

$$\begin{aligned}
 p_{EE} &= \sqrt[10]{0,5} \\
 &\approx 0,933
 \end{aligned} \tag{85}$$

ja rataluokassa D4

$$\begin{aligned}
 p_{DD} &= \sqrt[15]{0,5} \\
 &\approx 0,955.
 \end{aligned} \tag{86}$$

Matriisin rivisummaa koskevasta ehdosta (79) seuraa, että rataluokan alenemien

todennäköisyydet yhden aika-askelen aikana ovat

$$\begin{aligned} p_{ED} &= 1 - 0,933 \\ &= 0,067 \end{aligned} \quad (87)$$

ja

$$\begin{aligned} p_{DC} &= 1 - 0,955 \\ &= 0,045. \end{aligned} \quad (88)$$

Kaavan (84) todennäköisyysmatriisi on nyt

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \begin{bmatrix} p_{EE} & p_{ED} & 0 \\ 0 & p_{DD} & p_{DC} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0,933 & 0,067 & 0 \\ 0 & 0,955 & 0,045 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (89)$$

Rataosien kuntoprosessin tila  $k$  aika-askelen kuluttua on siis

$$\mathbf{x}^{(k)} = \begin{bmatrix} 0,070 & 0,794 & 0,137 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,933 & 0,067 & 0 \\ 0 & 0,955 & 0,045 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^k. \quad (90)$$

Esimerkiksi neljän vuoden – eli eduskunnan yhden toimikauden – kuluttua alkuhetkestä prosessin tila on

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{(4)} &= \begin{bmatrix} 0,070 & 0,794 & 0,137 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,933 & 0,067 & 0 \\ 0 & 0,955 & 0,045 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^4 \\ &\approx \begin{bmatrix} 0,070 & 0,794 & 0,137 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,758 & 0,225 & 0,017 \\ 0 & 0,831 & 0,169 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\approx \begin{bmatrix} 0,053 & 0,675 & 0,272 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (91)$$

Mallin perusteella rataluokan C4 ratojen yhteispituus lähes kaksinkertaistuu neljän vuoden aikana, mikä vaikuttaa hieman liioitellulta. Liioittelu voi kuitenkin olla perusteltua: jos esimerkiksi Oulu–Kontiomäki-rataosasta vain jonkin lyhyen välin rataluokkaa joudutaan alentamaan, se vaikuttaa merkittävästi koko rataosan liikenteeseen. Malli on joka tapauksessa altis virheille, koska todennäköisyysmatriisiin  $\mathbf{P}$  alkioiden arviointi perustui vain oletuksiin eikä tutkittuun tietoon.

Mitä todenmukaisempia arvoja kuljetusten tarvitsijat pystyvät muutosten todennäköisyyksille arvioimaan, sitä enemmän malli heitä hyödyttää. Heidän mallista saamansa informaatio voi olla arvokasta, koska he voivat osoittaa sen avulla peilin muille osapuolille tietävänsä, kuinka paljon rataverkon kunto voi heikentyä, jos



rahoitus on riittämätöntä tai omaisuudenhallintaa muuten laiminlyödään.

## 4.6 Kuljetusten tarvitsijoiden vaikutusmahdollisuudet

Jos kuljetusten tarvitsijat onnistuvat mallintamaan rataverkon kuntoa riittävän hyvin, he voivat hyödyntää saamaansa informaatiota yrittäessään vaikuttaa päättäjien toimintaan. Kuljetusten tarvitsijat haluavat arvatenkin luoda päättäjille mahdollisimman myönteisen mielikuvan heitä itseään hyödyttävän hankkeen yhteiskunnallisista hyödyistä. Tämä onnistunee sitä paremmin, mitä uskottavamman analyysin kuljetusten tarvitsijat voivat lobbauksensa tueksi esittää. Lobbaus voidaan ajatella uutena kahden pelaajan välisenä pelinä, jossa omaisuudenhaltijat näyttäytyvät ulkopuolisina, neutraaleina toimijoina.

Lobbaaja voi esittää päättäjille omien vaikutusarvioidensa tueksi laskelman hyödyistä, jonka radan parantamistoimenpiteisiin myönnettävä rahoitus mahdollistaisi. Olkoon  $u_0$  hyödyn perusarvo, joka saadaan, jos lobbaus onnistuu heti. Lobbaajan aikakustannus on suuri, joten hyötyä on diskontattava suurehkolla korolla. Olkoon se  $r$ . Lobbauksesta aiheutuu lobbaajalle suoria kustannuksia, jotka ovat kuitenkin pieniä lobbauksen onnistuessa saatavaan hyötyyn nähden. Voitaneen olettaa, että lobbaajat sisällyttävät kustannukset diskonttokorkoonsa. Jos lobbaus onnistuu vuonna  $i$ , saatava hyöty on

$$u_i = \frac{u_0}{(1+r)^i}. \quad (92)$$

Olkoon  $p$  yksittäisen lobbauskerran onnistumistodennäköisyys, joka on vakio. Epäonnistumistodennäköisyys on vastaavasti sen komplementti  $1-p$ . Lobbaaja odottaa lobbauksen onnistuvan  $k$  vuoden kuluessa luottamustasolla  $\gamma$ , joten heidän edellyttämänsä onnistumistodennäköisyys  $p_0$  riippuu luottamustasosta  $\gamma$  ja vuosien määrästä  $k$  yhtälön

$$(1-p_0)^k = 1-\gamma \quad (93)$$

mukaisesti. Yksittäisen lobbauskerran onnistumistodennäköisyys on siis

$$p_0 = 1 - \sqrt[k]{1-\gamma}. \quad (94)$$

Todennäköisyys, että lobbaus onnistuu *täsmälleen* vuonna  $i$  on

$$\begin{aligned} p_i &= p_0 (1-p_0)^{i-1} \\ &= \left(1 - \sqrt[k]{1-\gamma}\right) \left(1 - \left(1 - \sqrt[k]{1-\gamma}\right)\right)^{i-1} \\ &= (1-\gamma)^{(i-1)/k} - (1-\gamma)^{i/k}. \end{aligned} \quad (95)$$

Lobbauksesta saatavan hyödyn odotusarvo on

$$\begin{aligned}
E[u] &= \sum_{i=1}^k p_i u_i \\
&= \sum_{i=1}^k p_0 (1-p_0)^{i-1} \frac{u_0}{(1+r)^i} \\
&= p_0 u_0 \sum_{i=1}^k \frac{(1-p_0)^{i-1}}{(1+r)^i} \\
&= u_0 \sum_{i=1}^k \frac{(1-\gamma)^{(i-1)/k} - (1-\gamma)^{i/k}}{(1+r)^i}.
\end{aligned} \tag{96}$$

Hyödyn odotusarvolla on jokin raja-arvo  $u_{\min} > 0$ , jota pienemmät hyödyt ovat hyvin vähämerkityksisiä. Vuosien määrän  $k$ , lobbaajien käyttämän diskonttokoron  $r$  ja yksittäisen lobbauskerran onnistumistodennäköisyyden  $p$  on täten toteutettava epäyhtälö

$$E[u] = u_0 \sum_{i=1}^k \frac{(1-\gamma)^{(i-1)/k} - (1-\gamma)^{i/k}}{(1+r)^i} > u_{\min}. \tag{97}$$

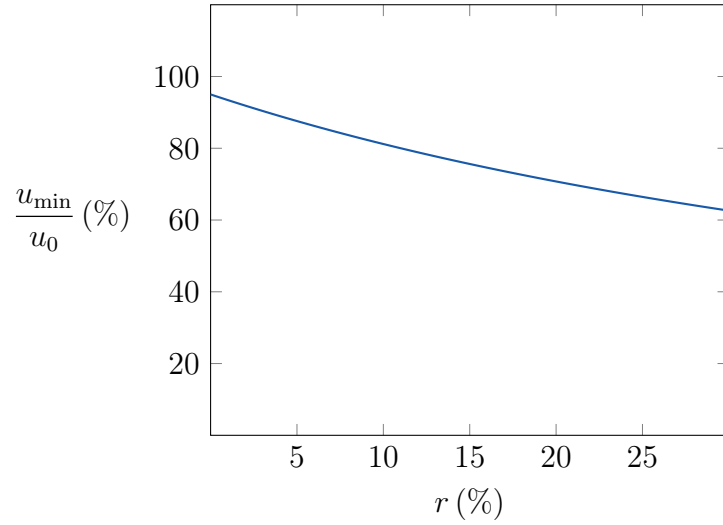
Jotta lobbaajan kannattaa edes ryhtyä lobbaamaan, hänen on uskottava, että lobbaus onnistuu neljän vuoden kuluessa, joten  $k = 4$ . Diskonttokoron  $r$  sekä hyödyn minimiarvon ja perusarvon suhteen  $u_{\min}/u_0$  välistä riippuvuutta kuvaa siis epäyhtälö

$$\frac{u_{\min}}{u_0} < \sum_{i=1}^4 \frac{(1-\gamma)^{(i-1)/4} - (1-\gamma)^{i/4}}{(1+r)^i} \tag{98}$$

Tarkastellaan epäyhtälön käyttäytymistä vakioimalla vuorotellen luottamustaso  $\gamma$  ja diskonttokorko  $r$ . Olkoon ensin  $\gamma = 95\%$ . Epäyhtälöstä (98) saadaan

$$\begin{aligned}
\frac{u_{\min}}{u_0} &< \sum_{i=1}^4 \frac{(1-0,95)^{(i-1)/4} - (1-0,95)^{i/4}}{(1+r)^i} \\
\frac{u_{\min}}{u_0} &< \frac{0,52713}{1+r} + \frac{0,24926}{(1+r)^2} + \frac{0,11787}{(1+r)^3} + \frac{0,05574}{(1+r)^4}.
\end{aligned} \tag{99}$$

Tämän graafinen esitys on kuvassa 17. Kuvan voi tulkita siten, että mitä suurempaa diskonttokorkoa lobbaaja käyttää – eli mitä enemmän hän arvostaa nykyhetkeä suhteessa tulevaisuuteen – sitä pienempään hyödyn minimiarvoon hän joutuu odotusarvoisesti tyytymään.

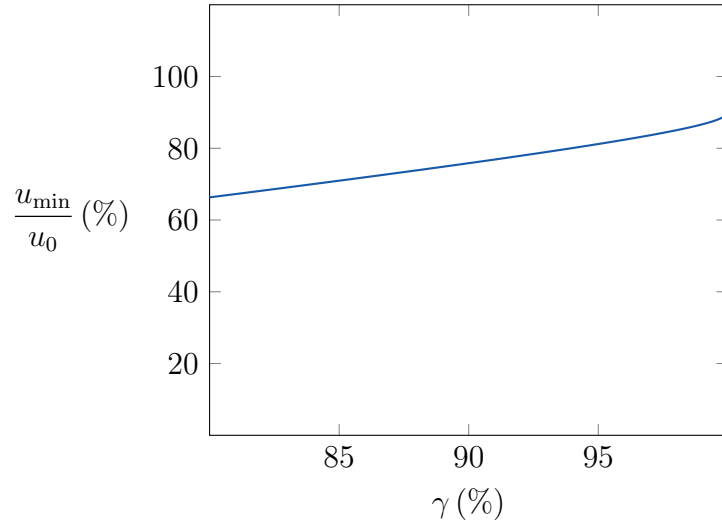


Kuva 17. Hyödyn minimiarvon ja perusarvon suhteen  $u_{\min}/u_0$  riippuvuus diskonttokorosta  $r$ , kun luottamustasoksi on vakioitu  $\gamma = 95\%$ .

Vakioidaan seuraavaksi diskonttokorko; olkoon se  $r = 10\%$ . Epäyhtälöstä (98) saadaan

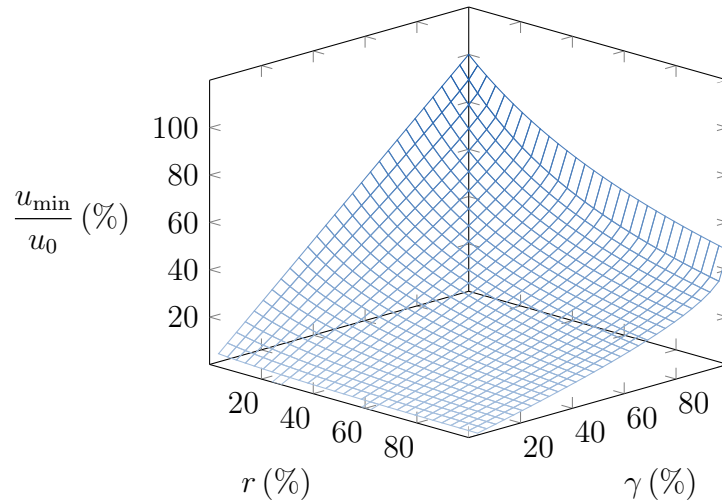
$$\begin{aligned} \frac{u_{\min}}{u_0} &< \sum_{i=1}^4 \frac{(1-\gamma)^{(i-1)/4} - (1-\gamma)^{i/4}}{(1+0,1)^i} \\ \frac{u_{\min}}{u_0} &< \frac{10}{11} - \frac{10}{121}(1-\gamma)^{1/4} - \frac{100}{1331}(1-\gamma)^{1/2} - \\ &\quad \frac{1000}{14641}(1-\gamma)^{3/4} - \frac{10000}{14641}(1-\gamma). \end{aligned} \quad (100)$$

Tämän graafinen esitys on kuvassa 18. Kuvasta voidaan päätellä, että mitä varmempaa lobbauksen onnistuminen on, sitä suurempaa hyödyn minimiarvoa hän voi lobbaukselta odottaa.



Kuva 18. Hyödyn minimiarvon ja perusarvon suhteen  $u_{\min}/u_0$  riippuvuus luottamustasosta  $\gamma$ , kun diskonttokoroksi on vakioitu  $r = 10\%$ .

Diskonttokoron  $r$  ja luottamustason  $\gamma$  yhteisvaikutus hyödyn minimiarvon ja perusarvon suhteeseen  $u_{\min}/u_0$  esitetään kuvassa 19.



Kuva 19. Hyödyn minimiarvon ja perusarvon suhteen  $u_{\min}/u_0$  riippuvuus diskonttokorosta  $r$  ja luottamustasosta  $\gamma$ .

Kuljetusten tarvitsijoiden lobbaushalukkuus riippuu heidän odottamastaan hyödyistä, heidän kärsivällisyyttään kuvaavasta diskonttokorosta sekä siitä, kuinka todennäköisenä he pitävät lobbauksen onnistumista. Peliä voidaan pitää formaalina yksinkertaistuksena monimutkaisten tosielämän tapahtumien kulusta.

Voitaneen todeta, että sopivia parametrioletuksia tekemällä ja monimutkaista todellisuutta yksinkertaistamalla pystytään luomaan lobbausta mallintava peli. Kuvatun

kaltainen lobbauspeli yksinkertaistuu melko nopeasti. Suoraviivaisesta pelistä tehtävät päätelmät voivat vaikuttaa jopa itsestäänselviltä. Peliteorian ansioksi voidaan kuitenkin lukea tapahtumien kuvaaminen tavanomaista formaalimmin.

## 5 Pohdinta ja päätelmät

Tätä diplomityötä varten tutkittu kirjallisuus viittaa peliteorian olevan kehityskelpoinen mallinnusmenetelmä väyläomaisuudenhallinnan kannalta. Käsiteltyjen tutkimusraporttien perusteella ainakin pelaajien välistä kilpailua, koalitionmuodostamista sekä vangin dilemmaa voidaan käyttää liikenne- tai tieteknisissä sovelluksissa. Kiinnostavia ovat myös kirjallisuudessa käytetyt ratkaisukeinot, kuten minimax-menetelmä, Aumannin–Shapleyn arvon määrittäminen, lineaarinen kokonaislukuoptimointi tai Markovin ketju.

Myös tässä diplomityössä onnistuttiin kuvaamaan väyläomaisuudenhallintaan liittyvää päätöksentekoa peliteoreettisesta näkökulmasta, joskin hyvin pelkistetysti. Kullekin pelin osapuolelle pyrittiin määrittämään tavoitteet ja preferenssit, jotka sitten määrittävät pelaajien hyötyfunktiot. Kuljetusten tarvitsijoiden ja omaisuudenhaltijoiden hyötyfunktioiden parametrisoinnissa hyödynnettiin varsinkin Liikenneviraston julkaisemia raportteja ja selvityksiä, joista saatiin tärkeitä lähtötietoja väyläomaisuuden tilasta sekä liikennöinnin ja radanpidon kustannusrakenteista. Kysynnän ja tarjonnan laista johdetuilla yksinkertaisilla laskentamenetelmillä pystyttiin estimoimaan eri toimenpiteiden hyötyjä ja kustannuksia. Mallintamisen ongelmaksi osoittautui kuitenkin heterogeenisen päättäjäjoukon käyttäytymisen kuvaaminen, minkä takia pelistä ei pystytty ratkaisemaan edes teoreettisia tasapainotulemia.

Yhdeksi tavaksi lähestyä päättäjien valintoja pohdittiin niiden näennäistä satunnaistamista. Jos muut pelaajat olettavat päättäjien kunkin strategiavalinnan toteutuvan jollakin tietyllä todennäköisyydellä, he voivat arvioida itse saamansa hyödyn odotusarvoa. Tätä näkökulmaa hyödynnettiin pohdittaessa kuljetusten tarvitsijoiden vaikutusmahdollisuuksia päättäjien toimintaan.

Työssä käytettyä yksinkertaista kustannustenlaskentamallia testattiin laskemalla sen avulla Oulu–Kontiomäki- ja Kontiomäki–Vartius-rataosien mahdollisesta parantamisesta koituvia kustannuksia. Saadut tulokset erosivat hieman Ratahallintokeskuksen julkaisemien kustannusarvioiden luvuista, mutta ne olivat kuitenkin samassa suuruusluokassa. Mallia voidaan siis pitää käyttökelpoisena, vaikka lähtöarvojen määrittämisessä onkin tarkentamisen varaa.

Kuluttajan ylijäämään perustuneiden hyötylaskelmien perusteella Oulu–Kontiomäki-rataosan parantaminen vaikutti kannattavalta, mutta Kontiomäki–Vartius-rataosan ei. Hyötylaskelmille ei ollut käytettävissä mitään luotettavia vertailuarvioita. Todettakoon kuitenkin, että edes Oulu–Kontiomäki-rataosan parantamisesta saatava hyöty ei ylittäisi parantamisen aiheuttamia laskennallisia kustannuksia, jos kuljetusten yksikkökustannussäästö olisi ollut vain noin 23 senttiä laskettua pienempi. Laskennan tulos kannattavuudesta voi siis heilahtaa päinvastaiseksi melko pienilläkin virheillä lähtöarvoissa.

Väylähankkeille on kuitenkin tyypillistä, että niiden liiketaloudellinen merkitys hä-

märtyy. Tämä on oikeastaan lähes väistämätön seuraus siitä, että väylät rahoitetaan julkisista varoista, mutta niistä saatava tuotto valuu tavaroiden ja ihmisten liikkumisesta hyötyville yksilöille ja yrityksille. On selvää, että tällainen liikenne aiheuttaa monesti myös ulkoishyötyjä, mutta niiden kvantifioiminen on monimutkaista. Juuri tällaisten intressiristiriitojen ratkaisemiseen peliteoreettinen tarkastelu on oiva menetelmä, joka kannustaa asettumaan toisen pelaajan asemaan.

Hyötyjen ja kustannusten epäsymmetrinen kohdistuminen tekee lobbauksesta houkuttelevan vaihtoehdon. Lobbaus on kuitenkin usein kokonaisuuden kannalta haitallista toimintaa, koska se ei sellaisenaan tuota mitään. Tällaisen nollasummapelin voittamiseen käytettävien resurssien vaihtoehtoisuus on jokin toteutumatta jäävä tuottava toiminta. Yksinkertaiseksi esimerkiksi sopii ajatusleikki, jossa hyötyjät käyttäisivät lobbausrahat suoraan väyläinvestointiin, mikä vähentäisi julkistaloudelle koituvia kustannuksia. ”Hyötyjä maksaa” -periaatteen soveltamista väyläomaisuudenhallintaan voitaisiin pohtia laajemminkin.

Kuljetusten tarvitsijoiden, omaisuudenhaltijoiden ja päättäjien välisessä pelissä valinnat kuvattiin diskreetteinä, mutta monet funktiot, kuten määrärahan suuruus, ovat todellisuudessa jatkuvia. Tämä on merkittävä puute mallissa. Kuitenkin jo pelkkä mallin koostaminen ja parametrien arvioiminen auttavat ymmärtämään paremmin omaisuudenhallintaan liittyviä ilmiöitä. Omaisuudenhaltijat ja kuljetusten tarvitsijat voivat hyödyntää näitä menetelmiä yrittäessään vaikuttaa päättäjiin, joiden valintojen määrittäminen ei diplomityössä onnistunut. Jos päättäjien kanssa vuorovaikuttavat sidosryhmät onnistuvat vaikuttamisessaan esimerkiksi tietoa jakamalla tai kouluttamalla, niiden voi olla helpompaa ennakoida, minkälaisia päätöksiä päättäjät tekevät.

Päätöksentekopelin tasapainopistettä ei pystytty ratkaisemaan, koska kaikkien pelaajien preferenssejä ei pystytty määrittelemään riittävän tarkasti. Tutkimusongelman periaate oli yksinkertainen, mutta toteutus osoittautui varsin monisyiseksi ja laajaksi kokonaisuudeksi. Asian järjestelmällisempi tutkiminen olisi monitieteellinen tehtävä, joka ansaitsisi insinöörimäisen näkökulman lisäksi ainakin perusteellista yhteiskuntatieteellistä pohdintaa ja syvällisempää peliteorian tuntemusta.

Pelin tarkastelukohteeksi valittiin tarkoituksella rataverkko, koska sen käyttäjäryhmä on paljon rajatumpi kuin tieverkolla. Koska pelin keskeiseksi ongelmaksi paljastui kuitenkin päättäjien – eikä kuljetusten tarvitsijoiden – käyttäytymisen kuvaaminen, voisi olla kiinnostavaa pohtia myös tieverkon rahoituspäätöksiä. Tiehankkeiden analyysin kiinnostavuutta puoltaa niiden suora ja konkreettinen vaikutus lähes jokaisen arkeen. On helppo kuvitella tilanne, jossa paikallisesti tärkeän tien tai kadun huono kunto aiheuttaa voimakkaitakin reaktioita ihmisissä, mutta valtakunnallisesti merkittävän rautatien välttämättä ei. Tässä mielessä myös päättäjien kannustimet ja preferenssit voisivat olla helpommin määriteltävissä.

Epätietoisuus päättäjien toiminnasta ei tietenkään olisi suuri ongelma, jos heidän

päätöstensä seuraukset eivät olisi niin merkittäviä. Yksi melko ilmeinen ratkaisu olisi taata omaisuudenhaltijoille nykyistä autonomisempi asema ja valtion talousarvioesityksestä riippumattomampi rahoitus, mitä tavoiteltiin vuoden 2017 alussa julkistetulla suunnitelmalla valtion liikenneverkkoyhtiön perustamisesta. Tällöin myös omaisuudenhaltijajoukon rooli pelaajana vahvistuisi, eikä sitä voitaisi enää yksinkertaistaa neutraaliksi altruistiksi, koska liikenneverkkoyhtiön tavoitteet voisivat olla ainakin osittain erilaiset kuin Liikennevirastolla. Ratkaisulla olisi varmasti omat hyvät ja huonot puolensa, eikä tässä yhteydessä ole mahdollista tai tarkoituksenmukaista arvioida niitä perusteellisesti. Kysymys on joka tapauksessa vaikea myös poliittisesti, kuten suunnitelman julkistamisesta seuranneesta julkisesta keskustelusta voitaneen päätellä.



## 6 Yhteenveto

Väyläomaisuudella tarkoitetaan Liikenneviraston hallinnoimien teiden, rautateiden ja vesiväylien väylärakenteita, laitteita sekä maa- ja vesialueita. Väyläomaisuudella on valtiolle ja yhteiskunnalle suuri välineellinen arvo, joka mitataan kymmenissä ellei sadoissa miljardeissa euroissa. Väyläomaisuuden arvo ei näy sellaisenaan valtion taseessa, vaan se voi esimerkiksi kapitalisoitua väyläverkosta hyötyvien tonttien, peltojen ja metsien arvoon. Väyläomaisuuden arvon hyödyntämistä kutsutaan väyläomaisuudenhallinnaksi.

Väyläomaisuudenhallinnan keskeisiä vuorovaikuttavia sidosryhmiä ovat omaisuudenhaltijoiden lisäksi väylien käyttäjät, liikennöitsijät sekä päättäjät. Eri sidosryhmien tavoitteet ja preferenssit voivat poiketa toisistaan, joten omaisuudenhallinta voidaan mieltää eräänlaiseksi peliksi, jossa kukin pelaaja pyrkii saavuttamaan omat tavoitteensa tietäen samalla, että muillakin pelaajilla on omat pyrkimyksensä. Tällaisten intressiristiriitojen analysointiin kehitettyä sovelletun matematiikan osa-aluetta kutsutaan peliteoriaksi.

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, voidaanko peliteoriaa hyödyntämällä tehostaa väyläomaisuudenhallintaan vaikuttavaa sidosryhmien välistä vuorovaikutusta. Ajatusta voidaan perustella jäsentämällä omaisuuden arvoa sidosryhmien hyöty- eli hyvinvointifunktioiden avulla. Peliteoriassa tutkitaan, minkälaisia strategisia valintoja tekemällä kukin pelaaja maksimoi hyötyfunktionsa arvon. Hyötyfunktion parametreja voidaan määritellä mitä moninaisimmilla tavoilla: puhtaiden rahallisten hyötyjen lisäksi funktiot voidaan määritellä riippuvaisiksi myös mistä tahansa kuviteltavissa olevista inhimillisistä tavoitteista. Tällaisten inhimillisten tavoitteiden hyötyä on tietenkin erittäin vaikeaa kvantifioida, mutta sitä pyritään tavallisesti kuvaamaan jossakin rahayksikössä.

Työn tarkastelukohteeksi valittiin peli, jonka kolme pelaajaa ovat omaisuudenhaltijoiden joukko, rautateiden tavarakuljetusten tarvitsijoiden joukko sekä päättäjien joukko. Omaisuudenhaltijoiden tavoitteena oli – määritelmän mukaisesti – omaisuuden arvon hyödyntäminen. Kuljetusten tarvitsijoiden ajateltiin toimivan normaalin liiketoimintalogiikan mukaisesti kustannuksia minimoiden ja tuottoa maksimoiden. Päättäjien määriteltiin pyrkivän maksimoimaan yhteiskunnallista hyvinvointia, mutta kuitenkin minimoimaan sitä varten tarvittavan määrärahan suuruus.

Kuljetusten tarvitsijoiden oletettiin käyttävän kuljetuksiinsa kahta hyvin samankaltaista rataosaa, joiden ainoa ero oli niiden suurin sallittu akselipaino. Liikenneviraston julkaisuista poimitun kuljetuskustannusrakenteen avulla estimoitiin suurimman sallitun akselipainon vaikutusta kuljetusten yksikkökustannuksiin. Samoja lähtötietoja käyttäen arvioitiin myös, kuinka paljon nämä laskennalliset yksikkökustannukset voisivat vähentyä, jos rataosia parannettaisiin kestävämpään suurempaan akselipainoja. Kysynnän ja tarjonnan lain mukaan kuljetuskustannusten väheneminen johtaa

kuljetusten kysytyn määrän kasvuun. Tästä seuraava kuluttajan ylijäämän kasvu määriteltiin kuljetusten tarvitsijoiden hyödyksi.

Koska väyläomaisuuden arvo ilmenee nimenomaan kuljetusten tarvitsijoiden saamana hyötynä, omaisuudenhaltijoiden hyöty määriteltiin täsmälleen samaksi kuin kuljetusten tarvitsijoiden hyöty. Hyödyn vastineeksi omaisuudenhaltijat joutuvat kuitenkin investoimaan rataosien parantamistoimenpiteisiin. Näiden investointikustannusten ohella arvioitiin myös suurempien akselipainojen vaikutusta ratojen kunnossapitokustannuksiin. Näidenkin kustannusten arvioimiseksi hyödynnettiin Liikenneviraston julkaisemia raportteja.

Kustannus- ja hyötylaskelmien lähtötietojen ja oletusten järkevyyttä testattiin soveltamalla niitä Oulu–Kontiomäki- ja Kontiomäki–Vartius-rataosien mahdollisiin parannustoimenpiteisiin. Saadut tulokset olivat samassa suuruusluokassa Ratahallintokeskuksen ilmoittamien kustannusarvioiden kanssa.

Jotta omaisuudenhaltijat voisivat toteuttaa valitsemansa parannus- ja kunnossapitotoimenpiteet, päättäjien on myönnettävä sitä varten riittävä rahoitus. Vaikka päättäjätkin haluavat todennäköisesti hyödyntää väyläomaisuuden arvoa, täytyy heidän kuitenkin usein verrata väylähankkeista saatavaa hyötyä johonkin muuhun yhteiskunnallisesti tärkeään asiaan, joka kilpailee samasta rajallisesta julkisesta rahoituksesta. Siksi todettiin, että omaisuudenhaltijat voivat vain arvioida, minkälaista todennäköisyysjakamaa päättäjien käyttäytyminen noudattaa.

Pelin kestoksi valittiin neljä vuotta, mikä vastaa yhtä eduskunnan toimikautta. Toimikauden aikana käydään kahdeksan pelivuoroa siten, että valintavuorossa oleva pelaaja valitsee aina kahden diskreetin strategiavaihtoehdon välillä. Pelillä on täten 256 mahdollista kehityskulkua, joista suurin osa pystyttiin rajaamaan pois tekemällä lisäoletuksia. Lopulliseksi tulemamääräksi saatiin 48. Tämä ei kuitenkaan riittänyt pelin ratkaisemiseksi, koska päättäjien käyttäytymisen mallintaminen oli liian vaikeaa, eikä heidän hyötyfunktioitaan siksi pystytty parametrisoimaan.

Työn lopussa pohdittiin vielä, voisivatko kuljetusten tarvitsijat vähentää päättäjien toiminnan näennäistä satunnaisuutta. Lähtökohdaksi oletettiin, että mitä parempaa informaatiota kuljetusten tarvitsijoilla on väyläomaisuuden tilasta, sitä parempia heidän vaikutusmahdollisuutensa päättäjiin ovat. Kuljetusten tarvitsijoille käyttökelpoiseksi mallinnuskeinoksi esitettiin yksinkertaista Markovin ketjua, joka kuvaa rataverkon tilan muutoksia tietyillä todennäköisyyksillä tietyn ajan kuluessa.

Työssä ei onnistuttu ratkaisemaan pelaajien teoreettisia tasapainostrategioita, koska kaikkia tärkeitä parametreja ei pystytty määrittelemään. Työssä käytettyjen esimerkkien ja tutkitun kirjallisuuden perusteella peliteoria on kuitenkin kehityskelpoinen menetelmä liikenne- ja tieteknisiin sovelluksiin, kuten väyläomaisuudenhallintaan.

## Viitteet

- Adler, N., Pels, E. & Nash, C. 2010. *High-speed rail and air transport competition: Game engineering as tool for cost-benefit analysis*. Transportation Research Part B: Methodological. Vol. 44, s. 812–833. Amsterdam, Alankomaat: Elsevier Ltd. ISSN 0191-2615. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261510000020/>, viitattu 10.4.2017.
- Aumann, R. J. & Hart, S. (toim.). 1992. *Handbook of Game Theory with Economic Applications*. Volume 1, s. xi–xii. 19.11.1992. Handbooks in Economics. Amsterdam, Alankomaat: Elsevier Science Publishers B.V. ISBN 978-0-444-88098-7. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/handbooks/15740005/1/>, viitattu 20.3.2017.
- Aumann, R. J. & Maschler, M. 1985. *Game Theoretic Analysis of a Bankruptcy Problem from the Talmud*. Journal of Economic Theory. Vol. 36, s. 195–213. 4.2.1985. San Diego, Kalifornia, Yhdysvallat: Academic Press, Inc. Saatavissa: <http://www.cs.cmu.edu/~arielpro/15896s15/docs/paper8.pdf>, viitattu 23.3.2017.
- Aumann, R. J. & Shapley, L. S. 1968. *Values of Non-Atomic Games, Part I: The Axiomatic Approach*, s. v. Santa Monica, Kalifornia, Yhdysvallat: The RAND Corporation. Saatavissa: [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research\\_memoranda/2009/RM5468.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_memoranda/2009/RM5468.pdf), viitattu 7.7.2017.
- Axelrod, R. & Hamilton, W. D. 1981. *The Evolution of Cooperation*. Science. Vol. 211, s. 1393–1398. 27.3.1981. Columbian liittopiiri, Yhdysvallat: American Association for the Advancement of Science. Saatavissa: <http://science.sciencemag.org/content/211/4489/1390/>, viitattu 27.10.2017.
- Banverket. 2005. *Beräkningshandledning – Hjälpmedel för samhällsekonomiska bedömningar inom järnvägssektorn*. Handbok BVH 706, s. 208. Saatavissa: <http://weber.itn.liu.se/~clary35/KURSER/TNK027/Referenslitteratur/Banverkets%20ber%C3%A4kningshandbok%20BVH706>, viitattu 6.9.2017.
- Bertrand, J. 1883. *Théorie mathématique de la richesse sociale*. Journal des Savants, s. 409–508. Saatavissa: <http://cruel.org/econthought/texts/marginal/bertrand83.pdf>, viitattu 24.3.2017.
- Castañó-Pardo, A. & Garcia-Diaz, A. 1995. *Highway Cost Allocation: An Application of the Theory of Nonatomic Games*. Transportation Research Part A: Policy and Practice. Vol. 29, s. 187–203. Oxford, Yhdistynyt kuningaskunta: Elsevier Science Ltd. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0965856494000278/>, viitattu 12.4.2017.
- Clemen, R. T. & Reilly, T. 2001. *Making Hard Decisions with DecisionTools®*, s. 543. Pacific Grove, Kalifornia, Yhdysvallat: Duxbury. ISBN 0-534-36597-3.

- Saatavissa: [https://books.google.com/books?id=9A1QAAAAMAAJ&redir\\_esc=y/](https://books.google.com/books?id=9A1QAAAAMAAJ&redir_esc=y/), viitattu 25.4.2017.
- Cournot, A. A. 1838. *Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses*. Pariisi, Ranska: Chez L. Hachette, Libraire de l'Université Royale de France. Saatavissa: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6117257c/>, viitattu 24.3.2017.
- Desens, J. & Petersen, J. 2017. *Infrastructure Asset Management*. South Dakota Municipalities, s. 20. Fort Pierre, Etelä-Dakota, Yhdysvallat: South Dakota Municipal League. Saatavissa: [http://clark-eng.com/wp-content/uploads/2017/01/SDML\\_Magazine\\_Clark\\_Article.pdf](http://clark-eng.com/wp-content/uploads/2017/01/SDML_Magazine_Clark_Article.pdf), viitattu 25.7.2017.
- Dodd, E. L. 1918. *Fundamentals in the Mathematics of Investment*. The American Mathematical Monthly. Vol. 25, s. 387–389. Lancaster, Pennsylvania, Yhdysvallat: Mathematical Association of America. <https://www.jstor.org/stable/pdf/2974341.pdf>, viitattu 16.8.2017.
- Estola, M. 2008. *Mikrotalousteorio 2, 2008, osa IV*, s. 4. Itä-Suomen yliopisto. Saatavissa: <http://cs.uef.fi/~estola/mikro2/mikro2008osa4.pdf>, viitattu 20.3.2017.
- Estola, M. 2013. *Peliteorian perusteita*, s. 2. 29.11.2013. Itä-Suomen yliopisto. Saatavissa: <http://cs.uef.fi/~estola/Mikro%201/peliteoria.pdf>, viitattu 17.3.2017.
- European Union Road Federation. 2014. *Road Asset Management*. An ERF Position Paper for Maintaining and Improving a Sustainable and Efficient Road Network, s. 11 ja 13. Saatavissa: <http://erf.be/images/Road-Asset-Management-2014-07.pdf>, viitattu 21.8.2017.
- Fisk, C. S. 1983. *Game Theory and Transportation Systems Modelling*. Transportation Research Part B: Methodological. Vol. 18, s. 304. Oxford, Yhdistynyt kuningaskunta: Pergamon Press Ltd. Saatavissa: <http://www.its.uci.edu/~yangi/papers/Fisk.1984.TR-B.18.pdf>, viitattu 4.8.2017.
- Gibbons, R. 1992. *A Primer in Game Theory*, s. xi. Harlow, Yhdistynyt kuningaskunta: Pearson Education Limited. ISBN 978-0-7450-1159-2. Saatavissa: [http://www.course.sdu.edu.cn/G2S/eWebEditor/uploadfile/20120410083641\\_781359346938.pdf](http://www.course.sdu.edu.cn/G2S/eWebEditor/uploadfile/20120410083641_781359346938.pdf), viitattu 17.3.2017.
- Gintis, H. 2009. *Game Theory Evolving: A Problem-Centered Introduction to Modeling Strategic Interaction*. Second Edition, s. 36 ja 39. Princeton, New Jersey, Yhdysvallat: Princeton University Press. ISBN 978-0-691-14051-3. Saatavissa: <http://www.umass.edu/preferen/Game%20Theory%20Evolving/GTE%20Public/GTE%20Game%20Theory%20Basic%20Concepts.pdf>, viitattu 4.4.2017.

- Hulten, C. R. 1991. *The Measurement of Capital*. Teoksessa Berndt, E. R. & Triplett, J. E. (toim.). *Fifty Years of Economic Measurement: The Jubilee of the Conference on Research in Income and Wealth*, s. 126. Chicago, Illinois, Yhdysvallat: University of Chicago Press. ISBN 0-226-04384-3. Saatavissa: <http://www.nber.org/chapters/c5974.pdf>, viitattu 9.3.2017.
- Hykšová, M. 2004. *Several Milestones in the History of Game Theory*. Teoksessa: Jubiläen – Chance oder Plage? VII. Österreichisches Symposion zur Geschichte der Mathematik, s. 50. 16.–22.5.2004. Wien, Itävalta: Technische Universität Wien, Institut für Technische Mathematik. Saatavissa: [http://euler.fd.cvut.cz/predmety/game\\_theory/files/Hyksova2004.pdf](http://euler.fd.cvut.cz/predmety/game_theory/files/Hyksova2004.pdf), viitattu 23.3.2017.
- Iikkanen, P. 2007. *Rautateiden tavaraliikenteen kilpailun kohdistuminen ja vaikutusten arviointi*. Strategioita ja selvityksiä 1/2007, s. 26. Helsinki: Ratahallintokeskus. ISBN 978-952-445-190-1. ISSN 1795-7540. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk\\_1-2007\\_rautateiden\\_tavaraliikenteen.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_1-2007_rautateiden_tavaraliikenteen.pdf), viitattu 5.9.2017.
- Iikkanen, P. 2013. *Rautatieliikenteen kustannusmallit*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 15/2013, s. 26–27 ja 37–39. Helsinki: Liikennevirasto. ISBN 978-952-255-283-9. ISSN 1798-6664. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts\\_2013-15\\_rautatieliikenteen\\_kustannusmallit\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2013-15_rautatieliikenteen_kustannusmallit_web.pdf), viitattu 8.5.2017.
- Inkala, M. & Kähkönen, A. 2005. *Väyläomaisuuden hallinnan tutkimusohjelma (VOH) on parantanut tieverkon hallintaa*. Tiennäyttäjä 3/2005, s. 14. Saatavissa: [http://alk.tiehallinto.fi/voh/Julkaisut\\_lehti/tiennayttaja\\_2005-3\\_VOH\\_parantanut.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/voh/Julkaisut_lehti/tiennayttaja_2005-3_VOH_parantanut.pdf), viitattu 14.2.2017.
- Investopedia, LLC. 2017. *Shortage*. Saatavissa: <http://www.investopedia.com/terms/s/shortage.asp>, viitattu 17.7.2017.
- Janusch, N. 2016. *A note on the distortionary effects of revenue-neutral tolls in a bottleneck congestion game*. Transportation Research Part A: Policy and Practice. Vol. 92, s. 95–103. Amsterdam, Alankomaat: Elsevier Ltd. ISSN 0965-8564. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856416300660/>, viitattu 12.4.2017.
- Jovanović, S. & Zoeteman, A. 2010. *Modern condition-based railway infrastructure asset management*, s. 2–4 First International Conference on Road and Rail Infrastructure. 17.–18.5.2010. Opatija, Kroatia. Saatavissa: <http://www.mermecgroup.com/mermec-incorso/images/File/papers/CETRA2010-paper-B.pdf>, viitattu 25.7.2017.
- Jääskeläinen, T. 2005. *Peliä kovilla panoksilla*. Irakin sodan syttyminen peliteoreettisena asetelmana. Pro gradu -tutkielma, s. 35. Tampereen yliopisto, Poli-

tiikan tutkimuksen laitos. Saatavissa: <https://tampub.uta.fi/bitstream/handle/10024/92969/gradu00747.pdf>, viitattu 31.3.2017.

- Kalliokoski, A., Junes, J., Kansonen, J. & Eerikäinen, E. 2012. *Väyläverkoston yhtenäinen luokittelu kunnossapidon suunnittelua varten*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2012, s. 33. Helsinki: Liikennevirasto. ISBN 978-952-255-119-1. ISSN 1798-6664. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts\\_2012-10\\_vaylaverkoston-yhtenainen\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2012-10_vaylaverkoston-yhtenainen_web.pdf), viitattu 23.8.2017.
- Kiuru, T. 2007. *Akselipainon noston tekniset edellytykset ja niiden soveltuminen Luumäki-Imatra-rataosuudelle*. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 1/2007, s. 13–14. Helsinki: Ratahallintokeskus. ISBN 978-952-445-178-9. ISSN 1455-2604. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk\\_2007-a1\\_akselipainon-noston\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_2007-a1_akselipainon-noston_web.pdf), viitattu 4.5.2017.
- Kiuru, T., Sipilä, J., Vihma, S. & Viljanen, M. 2015. *Rataverkon välityskyvyn kehityskuva 2035*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 33/2015, s. 27. Helsinki: Liikennevirasto. ISBN 978-952-317-108-4. ISSN 1798-6664. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lts\\_2015-33\\_rataverkon\\_valityskyvyn\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lts_2015-33_rataverkon_valityskyvyn_web.pdf), viitattu 3.8.2017.
- Koskela, O.-L. 2011. *Ratojen elinkaariajattelu ja ratahankkeiden kannattavuuslaskennan ongelmat*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 8/2011, s. 46–47. Helsinki: Liikennevirasto. ISBN 978-952-255-623-3. ISSN 1798-6664. Saatavissa: [http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf3/lts\\_2011-08\\_ratojen\\_web.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2011-08_ratojen_web.pdf), viitattu 15.8.2017.
- Kuukasjärvi, K., Nyberg, M., Paasilehto, A., Perälä, H., Rantala, O.-P., Ristola, J., Similä, A., Takala, P., Thorström, E. & Vilkkonen, L. 2017. *Parempia väyliä – sujuvampaa liikennettä*. Selvitys liikenneverkon kehittämisestä liiketaloudellisesti: Liikenneverkko-yhtiö (Live). Raportit ja selvitykset 1/2017, s. 14. 19.1.2017. Helsinki: Liikenne- ja viestintäministeriö. ISBN 978-952-243-495-1. Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79176/Raportit%20ja%20selvitykset%201-2017%20Parempia%20v%C3%A4yli%C3%A4%20E2%80%93%20sujuvampaa%20liikennett%C3%A4.pdf>, viitattu 21.11.2017.
- Lahelma, Harri. Liikenneasiantuntija, Liikenne ja maankäyttö, Liikennevirasto. Kirjallinen tiedonanto: sähköpostiviesti 25.10.2017.
- Laporte, G., Mesa, J. A. & Perea, F. 2010. *A game theoretic framework for the robust railway transit network design problem*. Transportation Research Part B: Methodological. Vol. 44, s. 447–459. Amsterdam, Alankomaat: Elsevier Ltd. ISSN 0191-2615. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019126150900112X/>, viitattu 11.4.2017.

- Levinson, D. 2005. *Micro-foundations of congestion and pricing: A game theory perspective*. Transportation Research Part A: Policy and Practice. Vol. 39, s. 691–704. Amsterdam, Alankomaat: Elsevier Ltd. ISSN 0965-8564. Saatavissa: <https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/179927/Microfoundations.pdf>, viitattu 12.7.2017.
- Levinson, D. & Janusch, N. 2015. *Corrigendum to “Micro-foundations of Congestion and Pricing: A Game Theory Perspective” [Transp. Res. Part A 39 (2005) 691–704]*. Transportation Research Part A: Policy and Practice. Vol. 78, s. 144–145. Amsterdam, Alankomaat: Elsevier Ltd. ISSN 0965-8564. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856415001378/pdfft?md5=63dfe475bd452d03ef0025e11ffecc2b&pid=1-s2.0-S0965856415001378-main.pdf>, viitattu 12.7.2017.
- Liikenne- ja viestintäministeriö. 2017. *Ministeri Berner: Väylien rahoituksen uudistustarve on ratkaistava*. Tiedote. 23.1.2017. Saatavissa: <https://www.lvm.fi/-/ministeri-berner-vaylien-rahoituksen-uudistustarve-on-ratkaistava-920426>, viitattu 21.11.2017.
- Liikennevirasto. 2010. *Suomen rautatietilasto 2010*. Liikenneviraston tilastoja 6/2010, s. 31. ISBN 978-952-255-523-6. ISSN 1798-8128. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lti\\_2010-06-suomen-rautatietilasto\\_2010.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lti_2010-06-suomen-rautatietilasto_2010.pdf), viitattu 10.5.2017.
- Liikennevirasto. 2011. *Suomen rautatietilasto 2011*. Liikenneviraston tilastoja 5/2011, s. 31. ISBN 978-952-255-684-4. ISSN 1798-8128. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lti\\_2011-05-suomen-rautatietilasto\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lti_2011-05-suomen-rautatietilasto_web.pdf), viitattu 10.5.2017.
- Liikennevirasto. 2012. *Suomen rautatietilasto 2012*. Liikenneviraston tilastoja 4/2012, s. 31. ISBN 978-952-255-134-4. ISSN 1798-8128. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lti\\_2012-04-suomen-rautatietilasto\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lti_2012-04-suomen-rautatietilasto_web.pdf), viitattu 10.5.2017.
- Liikennevirasto. 2013. *Suomen rautatietilasto 2013*. Liikenneviraston tilastoja 9/2013, s. 29. ISBN 978-952-255-354-6. ISSN 1798-8128. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lti\\_2013-09-suomen-rautatietilasto\\_2013\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lti_2013-09-suomen-rautatietilasto_2013_web.pdf), viitattu 10.5.2017.
- Liikennevirasto. 2014. *Suomen rautatietilasto 2014*. Liikenneviraston tilastoja 2/2014, s. 29. ISBN 978-952-255-461-1. ISSN 1798-8128. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lti\\_2014-02-suomen-rautatietilasto\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lti_2014-02-suomen-rautatietilasto_web.pdf), viitattu 10.5.2017.
- Liikennevirasto. 2015a. *Suomen rautatietilasto 2015*. Liikenneviraston tilastoja 6/2015, s. 29. ISBN 978-952-317-106-0. ISSN 1798-8128. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lti\\_2015-06-suomen-rautatietilasto\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lti_2015-06-suomen-rautatietilasto_web.pdf), viitattu 10.5.2017.

- Liikennevirasto. 2015b. *Ratahankkeiden arviointiohje*. Liikenneviraston ohjeita 15/2013, s. 8 ja 23. ISBN 978-952-255-308-9. ISSN 1798-6648. Saatavissa: [http://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/34253/lo\\_2013-15\\_ratahankkeiden\\_arviointiohje\\_web\\_p%C3%A4ivitetty+21.10.2015.pdf](http://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/34253/lo_2013-15_ratahankkeiden_arviointiohje_web_p%C3%A4ivitetty+21.10.2015.pdf), viitattu 10.5.2017.
- Liikennevirasto. 2016a. *Rautateiden verkkoselostus 2018*. Liikenneviraston väylätietoja 2/2016, liitteet 6–8. 9.12.2016. ISBN 978-952-317-328-6. ISSN 1798-8284. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lv\\_2016-02\\_rautateiden\\_verkkoselostus\\_2018\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lv_2016-02_rautateiden_verkkoselostus_2018_web.pdf), viitattu 23.5.2017.
- Liikennevirasto. 2016b. *Rautatietilasto 2015*. Liikenneviraston tilastoja 7/2016, s. 12–13 ja 29. ISBN 978-952-317-295-1. ISSN 1798-8128. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lvi\\_2016-07\\_rautatietilasto\\_2015\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lvi_2016-07_rautatietilasto_2015_web.pdf), viitattu 9.5.2017.
- Liikennevirasto. 2017. *Luettelo rautatieliikennepaikoista 1.1.2017*. Liikenneviraston väylätietoja 1/2017, s. 80–81. ISSN 1798-8284. ISBN 978-952-317-382-8. Saatavissa: [https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/133920/lv\\_2017-01\\_978-952-317-382-8.pdf](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/133920/lv_2017-01_978-952-317-382-8.pdf), viitattu 8.5.2017.
- Lucchetti, R. 2011. *A Primer in Game Theory*, s. 3. Bologna, Italia: Società Editrice Esculapio s.r.l. ISBN 978-88-7488-468-1. Saatavissa: <http://www.robertolucchetti.com/public/uploads/2015/07/Esculapio180ttobre.pdf>, viitattu 20.3.2017.
- Luce, R. D. & Raiffa, H. 1957. *Games and Decisions: Introduction and Critical Survey*. New York, New York, Yhdysvallat: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-0-486-65943-5. Saatavissa: [https://books.google.com/books?id=uqDDAgAAQBAJ&redir\\_esc=y/](https://books.google.com/books?id=uqDDAgAAQBAJ&redir_esc=y/), viitattu 30.3.2017.
- Lähde, V. & Uusheimo, L. 2005. *Väyläomaisuuden arvonlaskenta suurennuslasin alla*. Tiennäyttäjä 3/2005, s. 18. Saatavissa: [http://alk.tiehallinto.fi/voh/Julkaisut\\_lehti/tiennayttaja\\_2005-3\\_vo\\_arvolaskenta.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/voh/Julkaisut_lehti/tiennayttaja_2005-3_vo_arvolaskenta.pdf), viitattu 14.2.2017.
- Mirowski, P. 1992. *What Were von Neumann and Morgenstern Trying to Accomplish?*. Teoksessa Weintraub, E. R. (toim.). *Toward a History of Game Theory*, s. 113. History of Political Economy. Durham, Pohjois-Carolina, Yhdysvallat: Duke University Press. ISBN 0-8223-1253-0. ISSN 0018-2702. Saatavissa: [https://books.google.com/books?id=9CHY2Gozh1MC&redir\\_esc=y/](https://books.google.com/books?id=9CHY2Gozh1MC&redir_esc=y/), viitattu 22.3.2017.
- Myerson, R. B. 1991. *Game Theory: Analysis of Conflict*, s. 1–2, 4–5 ja 97. Cambridge, Massachusetts, Yhdysvallat: Harvard University Press. ISBN 0-674-34115-5. Saatavissa: [https://books.google.com/books?id=E8WQFRCsNr0C&redir\\_esc=y/](https://books.google.com/books?id=E8WQFRCsNr0C&redir_esc=y/), viitattu 22.3.2017.



- Männistö, V. 2013. *OmaisuuDENhallinta Liikennevirastossa*, s. 16. 3.10.2013. Liikennevirasto. Saatavissa: <http://docplayer.fi/11056057-OmaisuuDENhallinta-liikennevirastossa-3-10-2013.html>, viitattu 16.3.2017.
- Nash, J. F., Jr. 1950. *Non-Cooperative Games*. Väitöskirja. Princeton University, Department of Mathematics. Saatavissa: [http://rbsc.princeton.edu/sites/default/files/Non-Cooperative\\_Games\\_Nash.pdf](http://rbsc.princeton.edu/sites/default/files/Non-Cooperative_Games_Nash.pdf), viitattu 24.3.2017.
- Osman, H. 2012. *Agent-based simulation of urban infrastructure asset management activities*. Automation in Construction. Vol. 28, s. 45–57. Amsterdam, Alankomaat: Elsevier B.V. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580512001161/>, viitattu 19.4.2017.
- Osman, H. & Nikbakht, M. 2014. *A game-theoretic model for roadway performance management. A socio-technical approach*. Built Environment Project and Asset Management. Vol. 4, s. 40–54. Bingley, Yhdistynyt kuningaskunta: Emerald Group Publishing Limited. ISSN 2044-124X. Saatavissa: <http://www.emeraldinsight.com/doi/full/10.1108/BEPAM-03-2013-0004>, viitattu 19.4.2017.
- Paavilainen, J. 2016. *Kuntainfran omaisuuDENhallinta*, s. 2. Suomen kuntatekniikan yhdistys ry. Maarakennuspäivä 29.9.2016. Helsinki. Saatavissa: [https://asiakas.kotisivukone.com/files/mank.kotisivukone.com/tiedostot/MRP\\_2016/Esitykset/1600C\\_Jyrki\\_Paavilainen.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/mank.kotisivukone.com/tiedostot/MRP_2016/Esitykset/1600C_Jyrki_Paavilainen.pdf), viitattu 23.8.2017.
- Paavilainen, J., Mäkelä, T. & Salkonen, R. 2009. *Rataverkon kunnon ja sen liikenteellisten vaikutusten visualisoinnin lähtökohdat*. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 1/2009, s. 32. Helsinki: Ratahallintokeskus. ISBN 978-952-445-269-4. ISSN 1797-6995. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk\\_2009-a1\\_rataverkon\\_kunnon\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_2009-a1_rataverkon_kunnon_web.pdf), viitattu 22.8.2017.
- Peltola, R. 2013. *Liikennealueiden arvo: suuri tuntematon*. Maankäyttö 4/2013, s. 37. 13.12.2013. Helsinki: Maankäyttö ry. ISSN 2323-4660. Saatavissa: <http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk413/mk413.pdf>, viitattu 22.6.2017.
- Picardo, E. 2016. *The Prisoner's Dilemma in Business and the Economy*. Investopedia, LLC. 2.8.2016. Saatavissa: <http://www.investopedia.com/articles/investing/110513/utilizing-prisoners-dilemma-business-and-economy.asp>, viitattu 21.7.2017.
- Pietikäinen, L. 2005. *Euroopan unionin ja Venäjän turskankalastus Itämerellä peliteoreettisesti tarkasteltuna*. Pro gradu -tutkielma, s. 22. Helsingin yliopisto, Taloustieteen laitos. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/20955/euroopan.pdf>, viitattu 31.3.2017.

- Polak, B. 2007. *Summary & Lessons of the First Class*. ECON 159: Game Theory. Open Yale Courses, s. 1. Yale University, Department of Economics. Saatavissa: <http://oyc.yale.edu/sites/default/files/summary%20of%20first%20class.pdf>, viitattu 5.4.2017.
- Policonomics. 2012a. *Game theory 1: Extensive form*. Saatavissa: <http://www.policonomics.com/lp-game-theory1-extensive-form/>, viitattu 4.4.2017.
- Policonomics. 2012b. *Game theory 1: Strategic form*. Saatavissa: <http://www.policonomics.com/lp-game-theory1-strategic-form/>, viitattu 4.4.2017.
- Policonomics. 2012c. *Information economics 1: Complete, incomplete information*. Saatavissa: <http://www.policonomics.com/lp-information-economics1-complete-incomplete-information/>, viitattu 31.3.2017.
- Policonomics. 2012d. *Information economics 1: Perfect, imperfect information*. Saatavissa: <http://www.policonomics.com/lp-information-economics1-perfect-imperfect-information/>, viitattu 31.3.2017.
- Ratahallintokeskus. 2007. *Suomen rautatietilasto 2007*, s. 29 ja 38. ISSN 1239-7180. Saatavissa: <http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/srt07.pdf>, viitattu 10.5.2017.
- Ratahallintokeskus. 2008a. *Suomen rautatietilasto 2008*, s. 29 ja 38. ISSN 1239-7180. Saatavissa: <http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/srt08.pdf>, viitattu 10.5.2017.
- Ratahallintokeskus. 2008b. *Ratainvestointien priorisoinnissa käytettävän vaikutustiedon kehittäminen*. Esiselvitys, s. 18. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk\\_2008\\_ratainvestointien\\_priorisoinnissa.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_2008_ratainvestointien_priorisoinnissa.pdf), viitattu 10.8.2017.
- Ratahallintokeskus. 2009. *Suomen rautatietilasto 2009*, s. 29 ja 38. ISSN 1239-7180. Saatavissa: <http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/srt09.pdf>, viitattu 10.5.2017.
- Riley, G. 2011. *Study Note – The Basic Economic Problem: Scarcity and Choice*. 13.9.2011. tutor2u. Saatavissa: <https://www.tutor2u.net/economics/blog/study-note-the-basic-economic-problem-scarcity-and-choice/>, viitattu 23.8.2017.
- Schenk, R. 2011. *Scarcity and Choice*. CyberEconomics. Saatavissa: <http://ingrimayne.com/econ/Introduction/ScarcityNChoice.html>, viitattu 23.8.2017.
- SFS-EN 15528. 2015. *Railway applications. Line categories for managing the interface between load limits of vehicles and infrastructure*, s. 24–25. 20.11.2015. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Saatavissa: <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/398513.html.stx>, viitattu 4.5.2017.

- SFS-ISO 55000. 2014. *Omaisuuudenhallinta. Yleiskuvaus, periaatteet ja termit*, s. 10, 14, 34 ja 36. 31.10.2014. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Saatavissa: <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/ISO/ID2/5/298426.html.stx/>, viitattu 17.3.2017.
- Shor, M. 2005a. *Constant Sum*. Dictionary of Game Theory, Game Theory .net. Saatavissa: <http://www.gametheory.net/dictionary/ConstantSum.html>, viitattu 30.3.2017.
- Shor, M. 2005b. *Cooperative Game*. Dictionary of Game Theory, Game Theory .net. Saatavissa: <http://www.gametheory.net/dictionary/CooperativeGame.html>, viitattu 28.3.2017.
- Shor, M. 2005c. *Non-Cooperative Game*. Dictionary of Game Theory, Game Theory .net. Saatavissa: <http://www.gametheory.net/dictionary/Non-CooperativeGame.html>, viitattu 28.3.2017.
- Sirkkiä, Teemu. Ylitarkastaja, Liikenteen palvelut, Liikennevirasto. Kirjallinen tiedonanto: sähköpostiviesti 8.8.2017.
- Styrman, A. 2001. *Peliteoria tietojenkäsittelijän työvälineenä*, s. 2. 11.4.2001. Älykkäiden järjestelmien tutkimusseminaari. Helsingin yliopisto. Saatavissa: <https://www.cs.helsinki.fi/u/myllymak/Teaching/2001/Spring/Seminar/styrman.ps>, viitattu 23.3.2017.
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2017. *Rakennetun omaisuuden tila 2017*, s. 21. Saatavissa: <http://roti.fi/wp-content/uploads/2015/12/ROTI-2017-raportti-1.pdf>, viitattu 22.6.2017.
- Suomen virallinen tilasto. 2017a. *Tieliikenteen tavarankuljetukset 2016*, s. 12. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN 1798-2995. Saatavissa: [http://tilastokeskus.fi/til/kttav/2016/kttav\\_2016\\_2017-04-28\\_fi.pdf](http://tilastokeskus.fi/til/kttav/2016/kttav_2016_2017-04-28_fi.pdf), viitattu 5.10.2017.
- Suomen virallinen tilasto. 2017b. *Maarakennuskustannusindeksi*. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN 1799-4063. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/maku/index.html>, viitattu 10.8.2017.
- The Sveriges Riksbank Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel. 1994. *Nobelprize.org*. Nobel Media AB 2014. Saatavissa: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/economic-sciences/laureates/1994/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/economic-sciences/laureates/1994/), viitattu 24.3.2017.
- Taimela, R. 2011. *Raidegeometrian suunnittelu*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2011, s. 11. Helsinki: Liikennevirasto. ISBN 978-952-255-665-3. ISSN 1798-6664. Saatavissa: [http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf3/lts\\_2011-22\\_raidegeometrian\\_suunnittelu\\_web.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2011-22_raidegeometrian_suunnittelu_web.pdf), viitattu 6.6.2017.

- Tiehallinto. 2005a. *Väyläomaisuuden arvon laskennan kehittäminen ja hyväksikäyttö*. Sisäisiä julkaisuja 31/2005, s. 13 ja liite 3. ISSN 1458-1561. Saatavissa: [http://alk.tiehallinto.fi/voh/Projektit\\_julkaisut/julkaisu\\_voh\\_16\\_vo\\_arvon\\_laskennan\\_kehittaminen.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/voh/Projektit_julkaisut/julkaisu_voh_16_vo_arvon_laskennan_kehittaminen.pdf), viitattu 15.2.2017.
- Tiehallinto. 2005b. *Väyläomaisuuden hallinnan tutkimusohjelma. Osaselvitys VOH 3.1: Toimintalinjojen ja kuntotavoitteiden tietoaaineistojen kehittäminen ja yhtenäistäminen*. Loppuraportti. Päälystetyt tiedot, s. 22. 1.1.2005. Saatavissa: [http://alk.tiehallinto.fi/voh/Projektit\\_julkaisut/raportti\\_tietoaaineistojen\\_kehittaminen.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/voh/Projektit_julkaisut/raportti_tietoaaineistojen_kehittaminen.pdf), viitattu 15.2.2017.
- Tiehallinto. 2006. *Tieomaisuuden arvon määrittäminen ja seuranta. Selvitys IK-hankkeen tulosten soveltamismahdollisuuksista*. Sisäisiä julkaisuja 12/2006, s. 9. ISSN 1458-1561. Saatavissa: [http://alk.tiehallinto.fi/voh/Projektit\\_julkaisut/voh\\_16c\\_tieomaisuuden\\_arvon\\_maarittaminen\\_ja\\_seuranta.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/voh/Projektit_julkaisut/voh_16c_tieomaisuuden_arvon_maarittaminen_ja_seuranta.pdf), viitattu 16.2.2017.
- Tiehallinto. 2007. *Väyläomaisuuden hallinnan tutkimusohjelma 2003–2006*. Loppuraportti, s. 6. Saatavissa: [http://alk.tiehallinto.fi/voh/CD/pdf/VOH\\_loppuraportti.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/voh/CD/pdf/VOH_loppuraportti.pdf), viitattu 16.3.2017.
- Tunnen, N. 2016. *Rataverkon kiskotus 31.12.2016*. VR Track Oy. 23.2.2017. Saatavissa: [https://rhk-fi.directo.fi/tietopalvelu/rhk\\_n\\_extranet/](https://rhk-fi.directo.fi/tietopalvelu/rhk_n_extranet/), viitattu 22.5.2017.
- Uimonen, S. 2006. *Suomen tiepääoma*. Tiehallinnon selvityksiä 4/2006, s. 47. Helsinki: Tiehallinto. ISBN 951-803-667-5. ISSN 1459-1553. Saatavissa: [http://alk.tiehallinto.fi/voh/CD/pdf/julkaisu\\_suomen\\_tiepaaoma.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/voh/CD/pdf/julkaisu_suomen_tiepaaoma.pdf), viitattu 16.2.2017.
- Uimonen, S. 2008. *Suomen infrastruktuuripääoma: rautatiet*. VATT-keskustelualoitteita, s. 3. Valtion taloudellinen tutkimuskeskus. Helsinki: Oy Nord Print Ab. ISBN 978-951-561-760-6. ISSN 1795-3359. Saatavissa: <http://docplayer.fi/1802427-Vatt-keskustelualoitteita-vatt-discussion-papers-suomen-infrastruktuuri-paaoma-rautatiet-sakari-uimonen.html>, viitattu 9.3.2017.
- Uimonen, S. 2010. *Measuring the highway capital in Finland 1900–2009*. Tampere Economic Working Papers. Working Paper 81, s. 6 ja 70. Tampereen yliopisto, Taloustieteiden laitos. ISBN 978-951-44-8226-7. ISSN 1458-1191. Saatavissa: <http://tampub.uta.fi/bitstream/handle/10024/65412/wp81-2010.pdf>, viitattu 9.3.2017.
- Union internationale des chemins de fer. 2015. *Asset Management*. Saatavissa: <http://uic.org/asset-management/>, viitattu 27.6.2017.
- Union internationale des chemins de fer. 2016. *UIC Railway Application Guide. Practical implementation of Asset Management through ISO 55001*, s. 23.

- Pariisi, Ranska: Editions Techniques Ferroviaires. ISBN 978-2-7461-2521-6. Saatavissa: <http://www.shop-etf.com/en/uic-railway-application-guide-practical-implementation-of-asset-management-through-iso-55001.html>, viitattu 26.7.2017.
- Vailati, E. 2012. *A very fast intro to decision theory*. Philosophy 207: Probability and Decision. 24.–8.10.2012. Southern Illinois University Edwardsville. Saatavissa: <http://www.siu.edu/~evailat/decision.htm>, viitattu 5.4.2017.
- Valtiovarainministeriö. 2016. *Talousarvioesitys 2017*. Valtion tuotto- ja kululaskelma ja tase. Liikenneväylien korjausvelka, s. 7. 15.9.2016. Valtioneuvosto. Saatavissa: <http://budjetti.vm.fi/indox/download.jsp?lang=fi&file=/2017/tae/hallituksenEsitys/Yleisperustelut/9/9.pdf>, viitattu 22.6.2017.
- Vanier, D. J. 2000. *Asset management 101: a primer*, s. 4. National Research Council Canada. Saatavissa: <http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/accepted/?id=bbc680be-4440-4416-b0ae-5ffc3a10e762>, viitattu 18.4.2017.
- Vierth, I., Mellin, A., Hylén, B., de Jong, G. & Bucci, P. 2010. *Priselasticiteter som underlag för konsekvensanalyser av förändrade banavgifter för godstransporter*. Del A av studie på uppdrag av Banverket, s. 36–37. Linköping, Ruotsi: Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI). Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:670431/FULLTEXT01.pdf>, viitattu 5.9.2017.
- Wallenius, H. 2015a. *Kansantaloustieteen perusteet TU-91.1001*. Johdanto, s. 11. Luentomateriaali. 9.9.2015. Aalto-yliopisto, Perustieteiden korkeakoulu. Saatavissa: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/110510/mod\\_resource/content/1/Luento%201.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/110510/mod_resource/content/1/Luento%201.pdf), viitattu 28.8.2017.
- Wallenius, H. 2015b. *Kansantaloustieteen perusteet TU-91.1001*. Markkinoiden toiminta, s. 7. Luentomateriaali. 23.9.2015. Aalto-yliopisto, Perustieteiden korkeakoulu. Saatavissa: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/129726/mod\\_resource/content/1/Luento%203.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/129726/mod_resource/content/1/Luento%203.pdf), viitattu 8.9.2017.
- World Road Association. 2014. *The Importance of Road Maintenance*, s. 7. ISBN 978-2-84060-349-8. Saatavissa: [http://www.erf.be/images/Importance\\_of\\_road\\_maintenance.pdf](http://www.erf.be/images/Importance_of_road_maintenance.pdf), viitattu 23.8.2017.
- Wu, D., Yuan, C., Kumfer, W. & Liu, H. 2016. *A life-cycle optimization model using semi-markov process for highway bridge maintenance*. Applied Mathematical Modelling. Vol. 43, s. 49. Amsterdam, Alankomaat: Elsevier Inc. ISSN 0307-904X. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X16305534/>, viitattu 13.6.2017.
- Zoeteman, A. 2001. *Life cycle cost analysis for managing rail infrastructure*. Concept of a decision support system for railway design and maintenance. European Journal of Transport and Infrastructure Research Vol. 1,

s. 392. Delft, Alankomaat: Editorial Board EJTIR. Saatavissa: [https://dirkab7tlqy5f1.cloudfront.net/TBM/Over%20faculteit/Afdelingen/Engineering%20Systems%20and%20Services/EJTIR/Back%20issues/1.4/2001\\_04\\_04%20Life%20Cycle%20Cost%20Analysis%20for%20Managing%20Rail.pdf](https://dirkab7tlqy5f1.cloudfront.net/TBM/Over%20faculteit/Afdelingen/Engineering%20Systems%20and%20Services/EJTIR/Back%20issues/1.4/2001_04_04%20Life%20Cycle%20Cost%20Analysis%20for%20Managing%20Rail.pdf), viitattu 25.7.2017.

Äijö, J. & Virtala, P. 2011. *Liikenneväylien korjausvelka*. Laskentamallin kehitys ja testaus. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 42/2011, s. 14–15. Helsinki: Liikennevirasto. ISBN 978-952-255-715-5. ISSN 1798-6664. Saatavissa: [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts\\_2011-42\\_liikennevaylien\\_korjausvelka\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2011-42_liikennevaylien_korjausvelka_web.pdf), viitattu 21.6.2017.